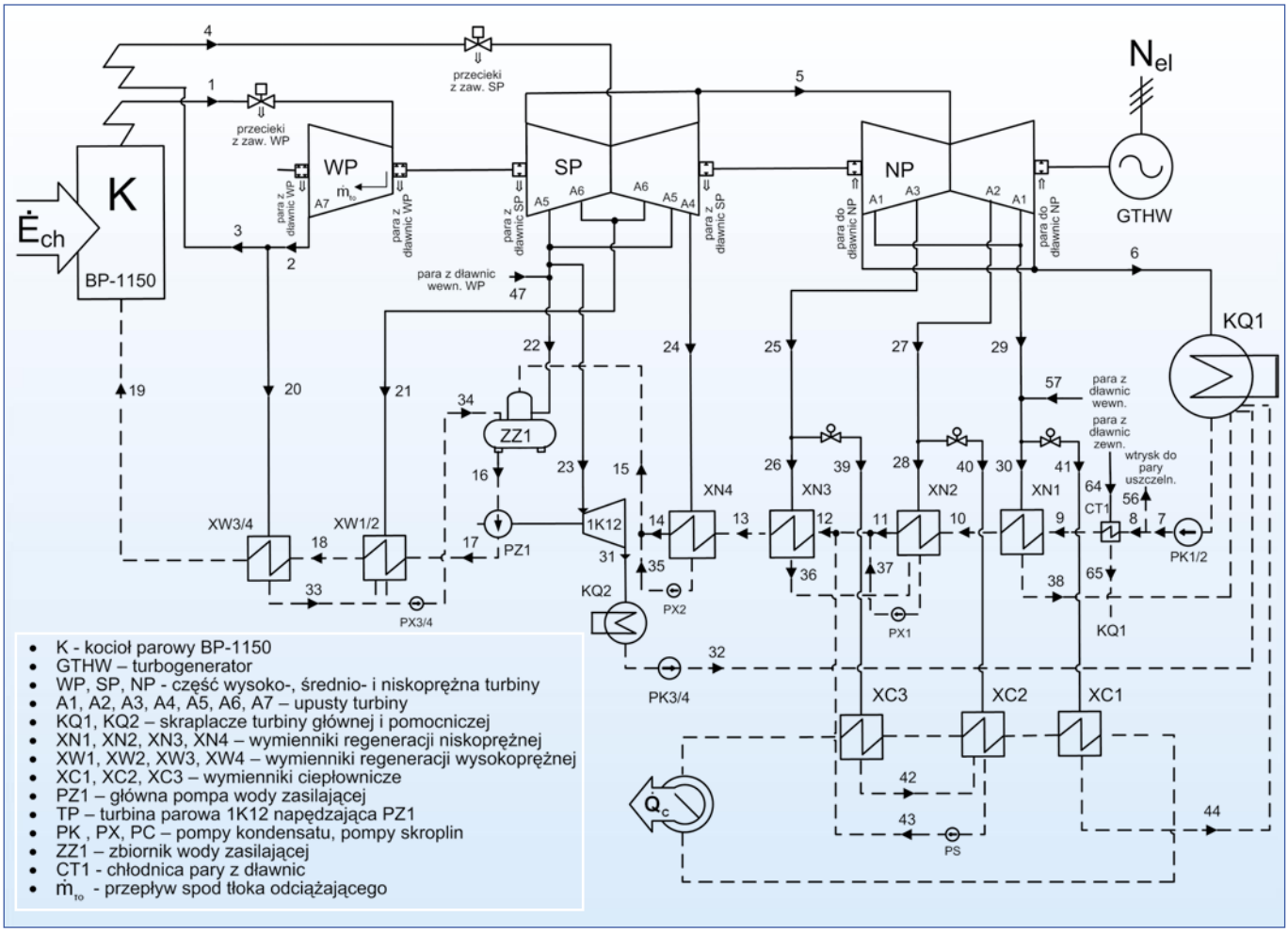
Ryszard Bartnik,
Politechnika Opolska, Katedra Techniki Cieplnej i Aparatury Przemysłowej, Instytut Techniki Cieplnej w Łodzi

Zbigniew Buryn
BOT Elektrownia Opole S.A.

Algorytm obliczeń optymalnej struktury wymienników ciepłowniczych przystosowujących blok o mocy elektrycznej 380 MW do pracy skojarzonej

Zmniejszenie zużycia energii chemicznej paliw, a tym samym zmniejszenie emisji szkodliwych produktów spalania do otoczenia ma bardzo istotne znaczenie [5]. Ważną zatem możliwością ze względów ekologicznych, ale równocześnie i energetycznych oraz ekonomicznych jest przystosowanie kondensacyjnych elektrowni węglowych do pracy w układzie skojarzonym i dostarczania przez nie oprócz energii elektrycznej również ciepła $\dot{Q}_c$ na potrzeby ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń $\dot{Q}_g$ oraz mocy cieplnej $\dot{Q}_{cwu}$ na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej – rysunek 1.

Taka możliwość analizowana jest obecnie w *Elektrowni Opole*. Rozważania takie były prowadzone również w przeszłości [6–8]. Przystosowanie elektrowni do pracy skojarzonej skutkować będzie poprawą ich całkowitej efektywność energetycznej, a w przypadku ich równoczesnej konwersji do układów dwupaliwowych, węglowo-gazowych, również zwiększeniem sprawności wytwarzania w nich energii elektrycznej [3]. Nastąpi wówczas równocześnie ograniczenie emisji zanieczyszczeń do środowiska naturalnego z dostosowaniem ich do wymogów unijnych norm.



Rys. 1. Ideowy schemat cieplny bloku energetycznego 380 MW pracującego w skojarzeniu

Poprawie może również ulec efektywność ekonomiczna pracy elektrowni. Zależeć to będzie w głównej mierze od relacji cenowych pomiędzy nośnikami energii, ceny ciepła do cen energii elektrycznej i paliwa oraz od wysokości taryf za zanieczyszczanie środowiska naturalnego. Należy w tym miejscu wręcz jednoznacznie sformułować tezę, że opanowane technologicznie i technicznie, i jednocześnie powszechnie stosowane urządzenia i instalacje energetyczne gwarantujące racjonalne korzystanie z paliw pierwotnych powinny decydować o granicznych (wyznaczanych dla założonej granicznej wartości efektywności ekonomicznej NPV) relacjach cenowych pomiędzy nośnikami energii i wysokościach taryf opłat środowiskowych, tak aby była zagwarantowana ekonomiczna opłacalność ich stosowania. Jak już zaznaczono, w dobie efektu cieplarnianego ma to szczególnie istotne znaczenie.

W pracy [1] poddano porównawczej, termodynamiczno-ekonomicznej analizie możliwe sposoby przystosowania zawodowych elektrowni węglowych do pracy skojarzonej. Przy aktualnych relacjach cenowych pomiędzy nośnikami energii najbardziej ekonomicznie uzasadniony jest wariant z wykorzystaniem upustów pary regeneracyjnej z części niskociśnieniowej turbiny do zasilania wymienników ciepłowniczych. Konieczna jest zatem szczegółowa, techniczno-ekonomiczna analiza takiego rozwiązania.

W celu przeprowadzenia analizy opracowano model matematyczny bloku energetycznego o mocy 380 MW, który obok bloku 200 MW jest podstawowym blokiem pracującym w krajowych elektrowniach. Model bazuje na równaniach bilansów energii i masy, zależnościach charakteryzujących pracę urządzeń oraz równaniach stanu czynnika roboczego.

Model rzeczywistego cieplnego układu technologicznego bloku uzupełniono o trzy szeregowo połączone wymienniki ciepłownicze XC1, XC2, XC3 zasilane kolejno parą grzejną z trzech upustów regeneracji niskociśnieniowej A1, A2, A3 – rysunek 1. W wymienniku XC1 można podgrzać wodę sieciową maksymalnie do temperatury t_g = 70°C, w XC2 do t_g = 90°C i w wymienniku XC3 do t_g = 135°C.

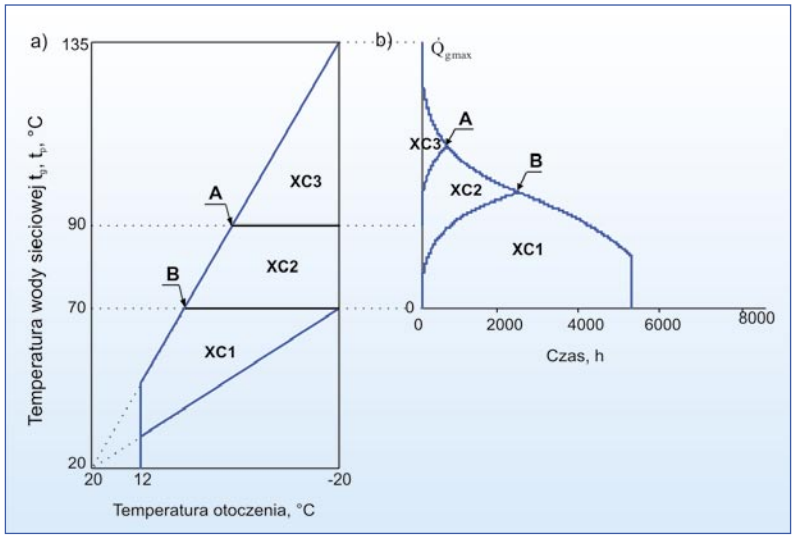
Pobór pary z upustów na potrzeby ciepła grzejnego jest przyczyną odstępstwa turbiny od jej nominalnych warunków pracy, przy których osiąga największą sprawność. Zmianie ulegają m.in. ciśnienia w poszczególnych stopniach turbiny. Co więcej, zmienne potrzeby na ciepło grzejne wymuszają każdorazowo zmiany strumieni pary zasilającej poszczególne wymienniki ciepłownicze, a tym samym czynią i te odstępstwa zmiennymi. Model matematyczny bloku musi zatem uwzględniać te zmiany i aby je „oddać" wykorzystuje się w nim równanie przelotowości turbiny Stodoli-Flügla [4].

Fundamentalnym pytaniem, na które przystosowując blok do pracy skojarzonej należy znaleźć odpowiedź, jest: która ze struktur wymienników będzie gwarantowała optymalną strategię inwestycyjną? Czy w przypadku dostarczania mocy cieplnej $\dot{Q}_c = \dot{Q}_g + \dot{Q}_{cwu}$ na potrzeby komunalne zgodnie z uporządkowanym wykresem całorocznych potrzeb cieplnych (rys. 2; na rysunku tym nie zaznaczono mocy cieplnej $\dot{Q}_{cwu}$ = 0,05–0,15 $\dot{Q}_{c\,max}$ na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej; moc ta dostarczana jest odbiorcom zarówno w sezonie grzewczym, jak i poza sezonem) optymalnym wariantem będzie zabudowa wszystkich trzech wymienników XC1, XC2, XC3, a może tylko dwóch z nich XC2 i XC3 lub XC1 i XC3, bądź wyłącznie jednego XC3? A w przypadku na przykład ogrzewania kombinatu szklarniowego dla uprawy roślin warzywnych i ozdobnych optymalną strukturą będą dwa wymienniki XC1 i XC2 lub XC2 i XC3, a może tylko jeden XC1?

Strumienie pary grzejnej zasilające poszczególne wymienniki ciepłownicze podlegają zmianom w zależności od temperatury otoczenia zgodnie z wykresem regulacji jakościowej – rysunek 2a. Na przykład strumień pary z upustu A3 zasilający wymiennik XC3 ma największą wartość w szczycie potrzeb na komunalne ciepło grzejne i wartość zerową w punkcie A oraz na prawo od niego – rysunek 2b. W punkcie tym i na lewo od niego z kolei strumień z upustu A2 przyjmuje stałą, największą wartość, gdy natomiast w punkcie B przyjmuje wartość równą zero, a strumień z upustu A1 zasilający wymiennik XC1 ma w tym miejscu wartość maksymalną.

W wariantach z dwoma wymiennikami strumienie pary z upustów A1 i A2 mają wartości zerowe odpowiednio dla układów z wymiennikami XC2 i XC3 oraz XC1, XC3 w całym obszarze wykresu uporządkowanego.

Gdy zmianie ulega struktura wymienników ciepłowniczych z XC1, XC2 i XC3 *na* XC1 i XC3, to ze względu, że strumień pary grzejnej z upustu A2 przyjmuje, jak już zaznaczono, zawsze, tj. w całym zakresie potrzeb cieplnych wartość zero, zmianie ulegają wartości strumieni pary grzejnej z upustu A3.



Rys. 2.
Regulacja jakościowa mocy cieplnej $\dot{Q}_g$ oddawanej z elektrowni na potrzeby ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń dla wariantu z trzema wymiennikami ciepłowniczymi XC1, XC2 i XC3:
a) prostoliniowy wykres regulacji;
b) roczny uporządkowany wykres zapotrzebowania na moc cieplną (t_g, t_p – temperatura wody sieciowej gorącej i powrotnej)

Zmienny strumień pary z upustu A3 w tym wariancie jest niewiele mniejszy od sumy zmiennych strumieni A2 i A3 z wariantu z trzema wymiennikami ciepłowniczymi (entalpia właściwa pary grzejnej z upustu A3 jest większa od entalpii z upustu A2), natomiast zmiany wartości strumienia pary z upustu A1 są w obu wariantach takie same.

W układzie z wymiennikami XC2 i XC3 całe ciepło produkowane w wymienniku XC1 musi przejąć wymiennik XC2 i zmienny strumień z upustu A2 jest zatem niemalże sumą zmiennych strumieni z upustu A2 i A1 z wariantu z trzema wymiennikami, przy czym zmiany wartości strumienia pary z upustu A3 są takie same w całym obszarze rocznego uporządkowanego wykresu potrzeb cieplnych, jak w wariancie z XC1, XC2 i XC3.

Im większa będzie ilość szeregowo zabudowanych wymienników, tym mniejsze będą straty egzergii w układzie, a tym samym większa będzie przy tych samych potrzebach cieplnych produkcja energii elektrycznej, ale równocześnie większe będą nakłady inwestycyjne. Istnieje zatem optimum techniczno-ekonomiczne, które należy znaleźć.

Jako kryterium doboru optymalnej struktury wymienników ciepłowniczych należy przyjąć kryterium ekonomiczne, kryterium maksymalizacji zysku osiąganego z eksploatacji przystosowanego do pracy skojarzonej bloku energetycznego. Kryterium ekonomiczne jest nadrzędne dla kryterium technicznego. W gospodarce rynkowej ostatecznie to opłacalność ekonomiczna decyduje o celowości zastosowania konkretnego rozwiązania technicznego i podjęciu decyzji inwestycyjnych.

Model matematyczny bloku energetycznego – bilanse masy i energii

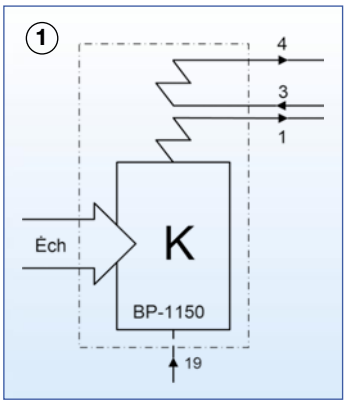
Model matematyczny bloku, którego strukturę przedstawiono na rysunku 1, sporządzony został na podstawie bilansów energii i masy, nieliniowych zależności charakteryzujących pracę urządzeń oraz nieliniowych równań stanu czynnika roboczego.

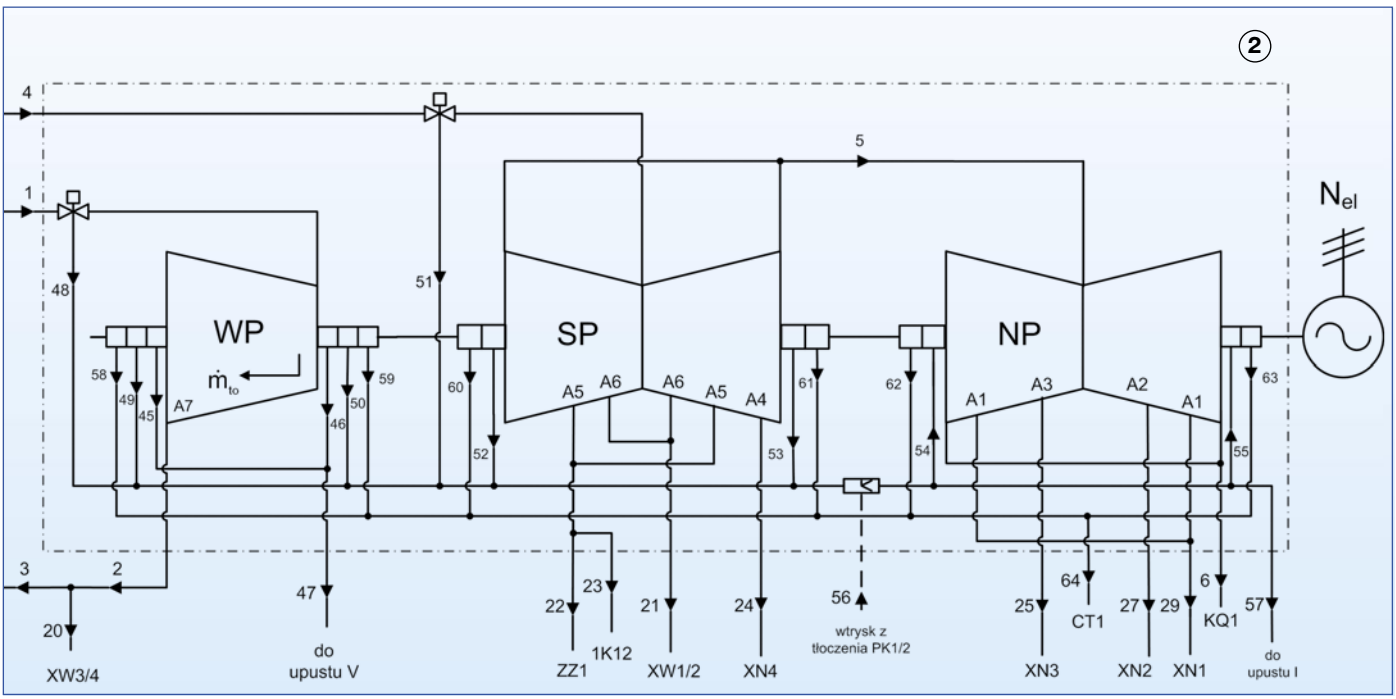
Poniżej zaprezentowano bilanse dla poszczególnych elementów bloku. Bilanse te stanowią układ algebraicznych równań liniowych, jako że wszystkie w nim wartości entalpii właściwych pary wodnej i wody $h_1 - h_{65}$ oraz wartości sprawności energetycznych urządzeń η_k, η_{em}, η_{m1K12}, η_{mPZ1} są danymi wielkościami wejściowymi. Danymi są również: spadek ciśnienia $\Delta p_{2\text{-}4}$, strumień pary świeżej m_1, strumienie pary grzejnej m_{39}, m_{40}, m_{41}, strumienie pary „przeciekowej" z dławnic i zaworów turbiny $m_{45} - m_{63}$, strumienie wody chłodzącej w skraplaczach m_{KQ1}, m_{KQ2} i ich temperatury T_{w2KQ1}, T_{w1KQ1}, T_{w2KQ2}, T_{w1KQ2} oraz temperatura otoczenia T_{ot} (temperatury T_{w2KQ1}, T_{w2KQ2} wyliczane są za pomocą iteracji z bilansów energii skraplaczy z równoczesnym obliczaniem w nich ciśnień i temperatur nasycenia).

Niewiadomymi są pozostałe strumienie masy oraz strumień energii chemicznej $\dot{E}_{ch}$ spalanego w kotle węgla i moc elektryczna bloku N_{el}. Niezmiennymi wielkościami wejściowymi dla każdego zbioru obliczeniowych danych wejściowych są: temperatury pary świeżej i wtórnie przegrzanej T_1 i T_4 oraz strumienie m_1, m_{KQ1}, m_{KQ2}. Układ dogodnie jest rozwiązać np. zaliczaną do grupy metod dokładnych metodą eliminacji Gaussa.

1.

$$\eta_k \dot{E}_{ch} + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{19} h_{19} - \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_4 h_4 = 0$$
$$\dot{m}_{19} - \dot{m}_1 = 0$$
$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = 0$$





2.

$\dot{m}_1h_1 - \dot{m}_2h_2 + \dot{m}_4h_4 - \dot{m}_6h_6 - \dot{m}_{21}h_{21} - \dot{m}_{22}h_{22} - \dot{m}_{23}h_{23} - \dot{m}_{24}h_{24} - \dot{m}_{25}h_{25} - \dot{m}_{27}h_{27} - \dot{m}_{29}h_{29} - \dot{m}_{47}h_{47} - \dot{m}_{57}h_{57} + \dot{m}_{56}h_{56} - \dot{m}_{64}h_{64} - N_{el}/\eta_{em} = 0$

$\dot{m}_1 - \dot{m}_{48} - \dot{m}_2 - \dot{m}_{45} - \dot{m}_{46} - \dot{m}_{49} - \dot{m}_{50} - \dot{m}_{58} - \dot{m}_{59} = 0$

$\dot{m}_4 - \dot{m}_{51} - \dot{m}_{21} - \dot{m}_{22} - \dot{m}_{23} - \dot{m}_{24} - \dot{m}_{52} - \dot{m}_{53} - \dot{m}_{60} - \dot{m}_{61} - \dot{m}_{25} - \dot{m}_{27} - \dot{m}_{29} - \dot{m}_{62} - \dot{m}_{63} + \dot{m}_{54} + \dot{m}_{55} - \dot{m}_6 = 0$

$\dot{m}_{45} + \dot{m}_{46} - \dot{m}_{47} = 0$

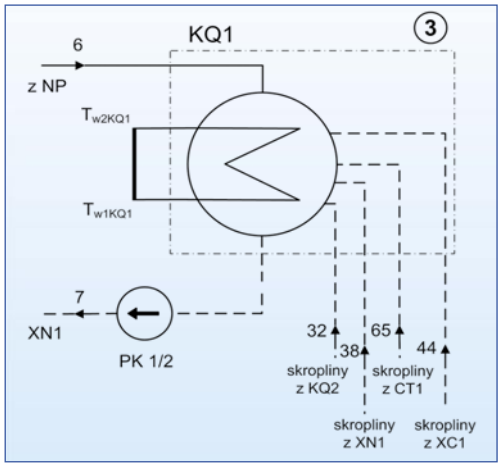
$\dot{m}_{48} + \dot{m}_{49} + \dot{m}_{50} + \dot{m}_{51} + \dot{m}_{52} + \dot{m}_{53} + \dot{m}_{56} - \dot{m}_{54} - \dot{m}_{55} - \dot{m}_{57} = 0$

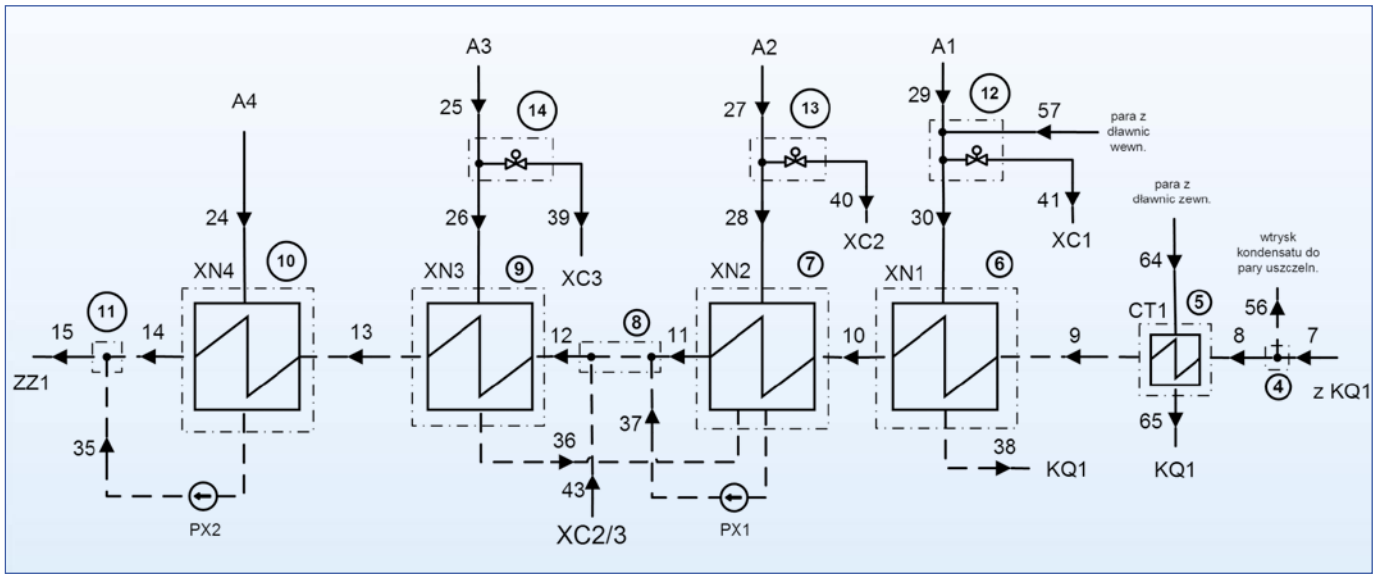
$\dot{m}_{58} + \dot{m}_{59} + \dot{m}_{60} + \dot{m}_{61} + \dot{m}_{62} + \dot{m}_{63} - \dot{m}_{64} = 0$

3.

$\dot{m}_6h_6 + \dot{m}_{32}h_{32} + \dot{m}_{38}h_{38} + \dot{m}_{44}h_{44} + \dot{m}_{65}h_{65} - \dot{m}_7h_7 - \dot{m}_{KQ1}c_w(T_{w2KQ1} - T_{w1KQ1}) = 0$

$\dot{m}_6 + \dot{m}_{32} + \dot{m}_{38} + \dot{m}_{44} + \dot{m}_{65} - \dot{m}_7 = 0$





4.

$h_7 = h_8 = h_{56}$

$\dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_{56} = 0$

5.

$\dot{m}_8h_8 + \dot{m}_{64}h_{64} - \dot{m}_9h_9 - \dot{m}_{65}h_{65} = 0$

$\dot{m}_8 - \dot{m}_9 = 0$

$\dot{m}_{64} - \dot{m}_{65} = 0$

6.

$\dot{m}_9h_9 + \dot{m}_{30}h_{30} - \dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_{38}h_{38} = 0$

$\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} = 0$

$\dot{m}_{30} - \dot{m}_{38} = 0$

7.

$\dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_{28}h_{28} + \dot{m}_{36}h_{36} - \dot{m}_{11}h_{11} - \dot{m}_{37}h_{37} = 0$

$\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} = 0$

$\dot{m}_{28} + \dot{m}_{36} - \dot{m}_{37} = 0$

8.

$h_{12} = (\dot{m}_{11}/\dot{m}_{12})h_{11} + (\dot{m}_{37}/\dot{m}_{12})h_{37} + (\dot{m}_{43}/\dot{m}_{12})h_{43}$

$\dot{m}_{11} + \dot{m}_{37} + \dot{m}_{43} - \dot{m}_{12} = 0$

9.

$\dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_{26}h_{26} - \dot{m}_{13}h_{13} - \dot{m}_{36}h_{36} = 0$

$\dot{m}_{12} - \dot{m}_{13} = 0$

$\dot{m}_{26} - \dot{m}_{36} = 0$

10.

$\dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{24}h_{24} - \dot{m}_{14}h_{14} - \dot{m}_{35}h_{35} = 0$

$\dot{m}_{13} - \dot{m}_{14} = 0$

$\dot{m}_{24} - \dot{m}_{35} = 0$

11.

$h_{15} = (\dot{m}_{14}/\dot{m}_{15})h_{14} + (\dot{m}_{35}/\dot{m}_{15})h_{35}$

$\dot{m}_{14} + \dot{m}_{35} - \dot{m}_{15} = 0$

12.

$\dot{m}_{29}h_{29} + \dot{m}_{57}h_{57} - \dot{m}_{41}h_{41} - \dot{m}_{30}h_{30} = 0$

$\dot{m}_{29} + \dot{m}_{57} - \dot{m}_{30} - \dot{m}_{41} = 0$

13.

$h_{27} = h_{28} = h_{40}$

$\dot{m}_{27} - \dot{m}_{28} - \dot{m}_{40} = 0$

14.

$h_{25} = h_{26} = h_{39}$

$\dot{m}_{25} - \dot{m}_{26} - \dot{m}_{39} = 0$

15.

$\dot{m}_{15}h_{15} + \dot{m}_{22}h_{22} + \dot{m}_{34}h_{34} + \dot{m}_{47}h_{47} - \dot{m}_{16}h_{16} = 0$

$\dot{m}_{15} + \dot{m}_{22} + \dot{m}_{34} + \dot{m}_{47} - \dot{m}_{16} = 0$

16.

$(\dot{m}_{23}h_{23} - \dot{m}_{31}h_{31})\eta_{m1K12} - (\dot{m}_{17}h_{17} - \dot{m}_{16}h_{16})/\eta_{mPZ1} = 0$

$\dot{m}_{16} - \dot{m}_{17} = 0$

$\dot{m}_{23} - \dot{m}_{31} = 0$

17.

$\dot{m}_{31}h_{31} - \dot{m}_{32}h_{32} - \dot{m}_{KQ2}c_w(T_{w2KQ2} - T_{w1KQ2}) = 0$

$\dot{m}_{31} - \dot{m}_{32} = 0$

18.

$\dot{m}_{17}h_{17} + \dot{m}_{21}h_{21} + \dot{m}_{33}h_{33} - \dot{m}_{18}h_{18} - \dot{m}_{34}h_{34} = 0$

$\dot{m}_{17} - \dot{m}_{18} = 0$

$\dot{m}_{21} + \dot{m}_{33} - \dot{m}_{34} = 0$

19.

$\dot{m}_{18}h_{18} + \dot{m}_{20}h_{20} - \dot{m}_{19}h_{19} - \dot{m}_{33}h_{33} = 0$

$\dot{m}_{18} - \dot{m}_{19} = 0$

$\dot{m}_{20} - \dot{m}_{33} = 0$

20.

$h_2 = h_3 = h_{20}$

$\dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_{20} = 0$

21.

$Q_{XC1} = \dot{m}_{41}h_{41} - \dot{m}_{44}h_{44}$

$\dot{m}_{41} - \dot{m}_{44} = 0$

22.

$\dot{Q}_{XC2} = \dot{m}_{40}h_{40} + \dot{m}_{42}h_{42} - \dot{m}_{43}h_{43}$

$\dot{m}_{40} + \dot{m}_{42} - \dot{m}_{43} = 0$

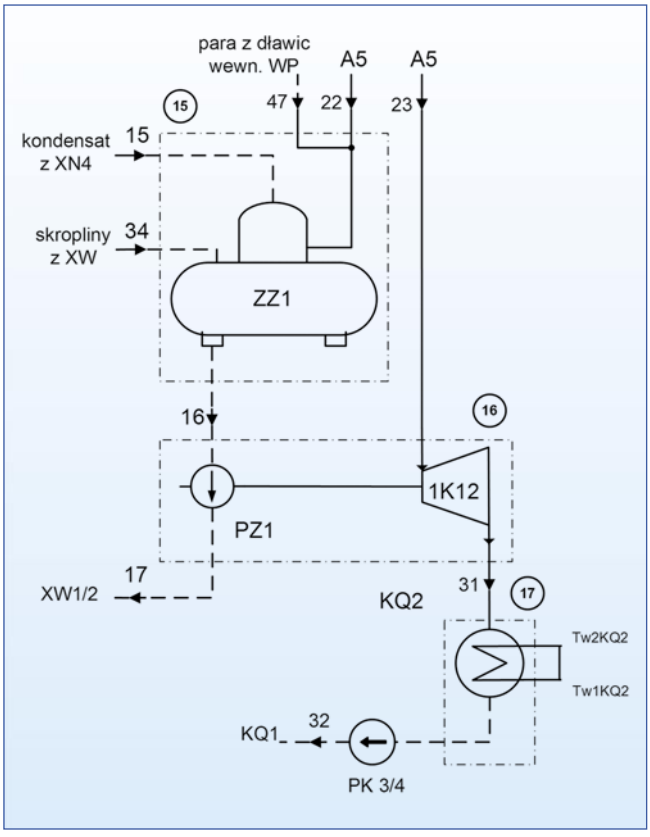
23.

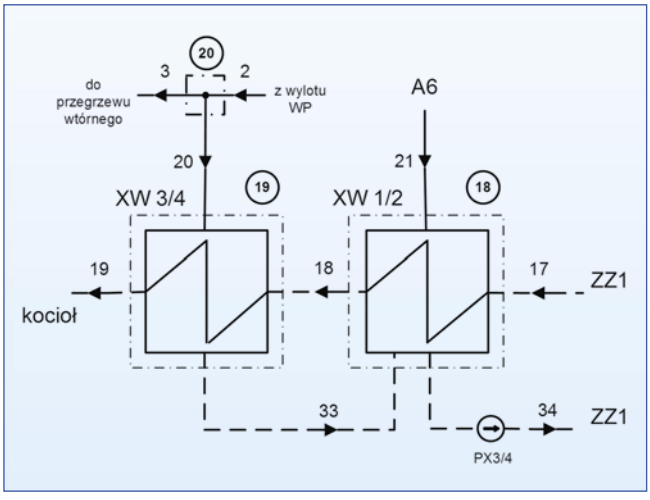
$\dot{Q}_{XC3} = \dot{m}_{39}h_{39} - \dot{m}_{42}h_{42}$

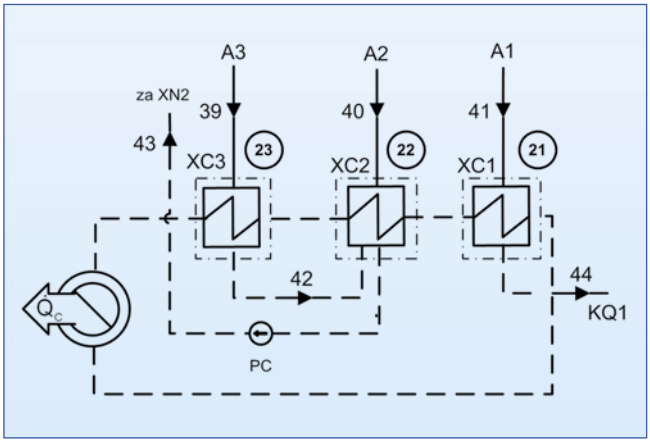
$\dot{m}_{39} - \dot{m}_{42} = 0$

przy czym:

$\dot{Q}_{XC1} + \dot{Q}_{XC2} + \dot{Q}_{XC3} = \dot{Q}_c = \dot{Q}_g + \dot{Q}_{cwu}$.







Algorytm obliczeń optymalnej struktury wymienników ciepłowniczych przystosowujących blok energetyczny o mocy elektrycznej 380 MW do pracy skojarzonej

Ekonomiczne kryterium doboru optymalnej struktury wymienników ciepłowniczych przedstawia się zależnością [2]:

$$NPV=\left[\frac{S_R^M-K_e^M}{\rho_M}+\frac{S_R^{M+1}-K_e^{M+1}}{(1+r)^{M+1}}+\right.$$
$$\left.+\left(S_R^{przyst}-K_e^{przyst}\right)\left(\frac{1}{\rho_N}-\frac{1}{\rho_{M+1}}\right)-J_O-\frac{J_M}{(1+r)^M}\right](1-p)(1-v_m)\rightarrow\max \quad (1)$$

Na rysunku 3 przedstawiono wykorzystywany we wzorze (1) czasowy schemat eksploatacji elektrowni z zaznaczonymi okresami jej eksploatacji przed i po jej przystosowaniu do pracy skojarzonej.

Argumentami kryterium zysku (1) są poniżej wymienione funkcje (zmienne decyzyjne):

J_M – nakłady inwestycyjne poniesione w roku M na przystosowanie elektrowni do pracy skojarzonej; J_M są sumą nakładów na magistralę cieplną (zależnych od jej długości) wraz pompami sieciowymi i instalacją uzupełniania magistrali cieplnej utrzymującą w niej konieczne ciśnienie statyczne wody sieciowej, nakładów na stację wymienników ciepłowniczych, które zależą od ich ilości, nakładów na przystosowanie turbiny do poboru upustowej pary grzejnej; $J_M = J_{ciep}^{mag} + J_{uzup}^{inst} + J_{wym}^{stac} + J_{turbin}^{przyst}$,

J_O – nakłady inwestycyjne poniesione na budowę elektrowni lub cena jej zakupu, np. od Skarbu Państwa, przez niezależnego inwestora IPP,

K_e – roczne koszty eksploatacji elektrowni; koszty eksploatacji K_e^{przyst} są funkcją m.in. rocznego zużycia energii chemicznej $E_{ch,R}$ węgla i jego ceny oraz opłat za zanieczyszczanie środowiska naturalnego,

v_m – względna wartość rynku ciepła i energii elektrycznej; procentowa wartość udziału Skarbu Państwa w całkowitym zysku osiąganym w trakcie eksploatacji elektrowni po jej sprzedaży inwestorowi IPP,

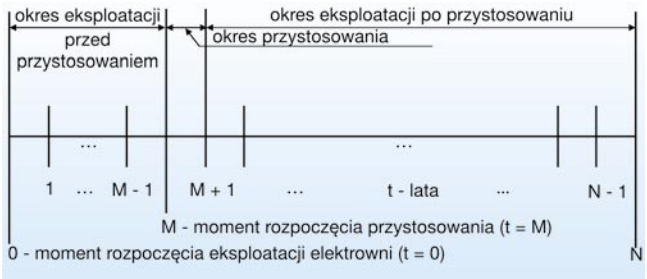
p – stopa podatku od zysku brutto Z_R: $Z_R = S_R - K_e - \sum_i \rho_{Xi} J_{Yi}$

r – stopa dyskonta kapitału inwestycyjnego zależąca od sposobu finansowania inwestycji,

S_R – roczne przychody z eksploatacji elektrowni; roczne przychody S_R^{przyst} są funkcją cen nośników energii oraz rocznej produkcji w elektrowni ciepła Q_R i energii elektrycznej $E_{el,R}$; ilość energii elektrycznej zależy od struktury zabudowanych wymienników ciepłowniczych,

ρ_M, ρ_{M+1}, ρ_N, ρ_{N-M} – roczne stopy amortyzacji wyrażone za pomocą stopy dyskonta r gwarantujące kolejno zwrot nakładów J_O i J_M łącznie z odsetkami po N i $N - M$ latach eksploatacji elektrowni.

Na rysunku 4 przedstawiono w ogólnym zarysie algorytm obliczeń optymalnej struktury wymienników ciepłowniczych przystosowujących blok energetyczny do pracy skojarzonej.



Rys. 3. Cykl eksploatacji elektrowni

W pierwszej kolejności wykonywane są obliczenia termodynamiczne, których wyniki są wielkościami wejściowymi do obliczeń ekonomicznych.

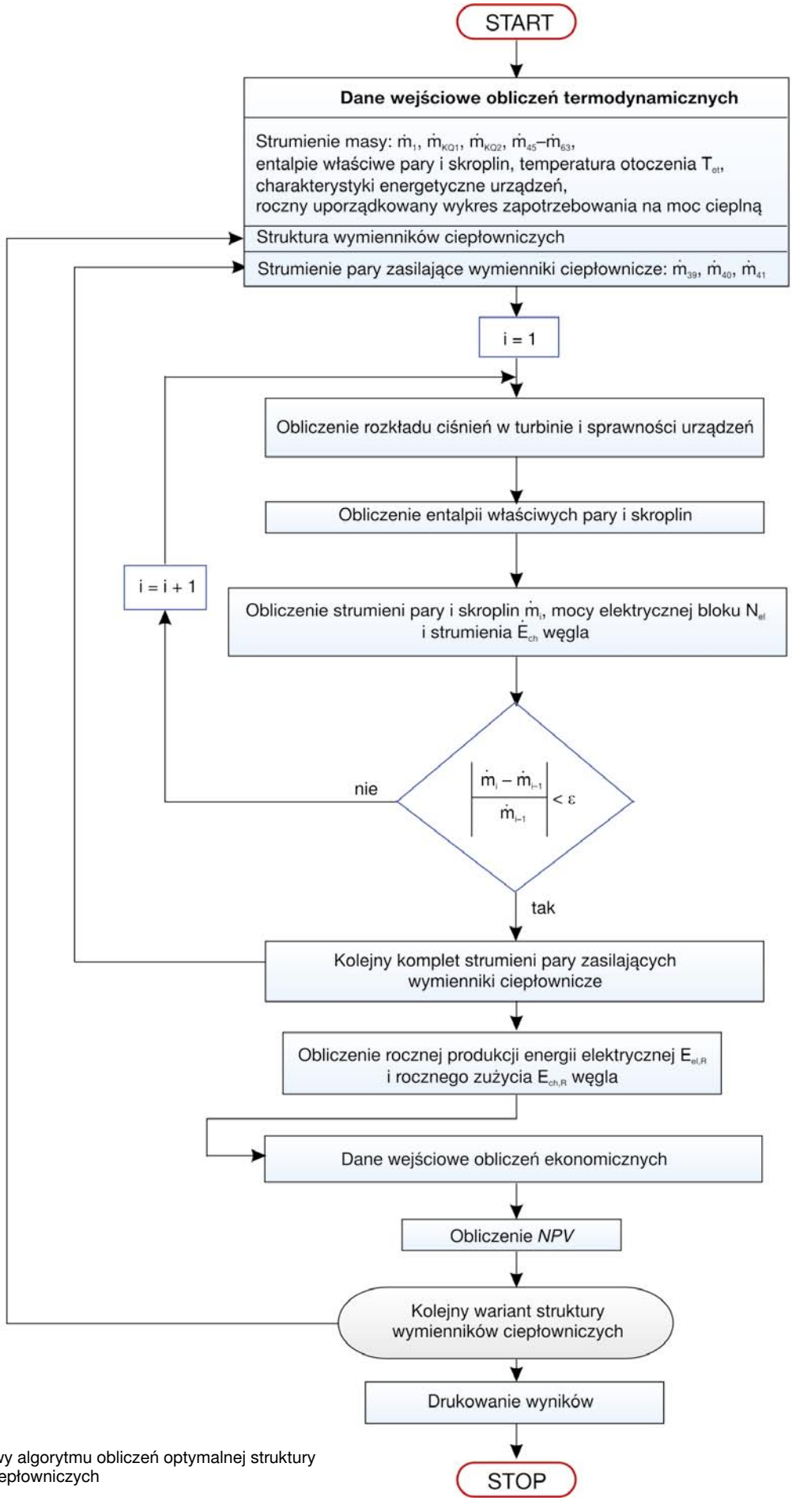
Po wprowadzeniu do modelu bloku wartości termodynamicznych danych wejściowych obliczana jest jego moc elektryczna oraz strumień energii chemicznej spalanego w kotle węgla. Wielkościami wejściowymi są: struktura wymienników ciepłowniczych, charakterystyki energetyczne urządzeń, strumień pary świeżej m_1, strumienie wody chłodzącej w skraplaczach $\dot{m}_{KQ1}$ i $\dot{m}_{KQ2}$, wartości termicznych parametrów pary świeżej i wtórnie przegrzanej, wartości ciśnień i temperatur pary w upustach i skraplaczach, termiczne parametry skroplin, temperatura otoczenia T_{ot}, komplet strumieni „przeciekowych" z dławnic i zaworów $\dot{m}_{45}$ – $\dot{m}_{63}$ oraz strumienie upustowej pary grzejnej $\dot{m}_{39}$, $\dot{m}_{40}$, $\dot{m}_{41}$ zasilających poszczególne wymienniki ciepłownicze przy założonej ich strukturze.

Wartości tych strumieni wyliczane są z wykorzystaniem rocznego uporządkowanego wykresu zapotrzebowania na komunalną lub technologiczną moc cieplną oraz krzywych ograniczających moce poszczególnych wymienników wynikających z regulacji jakościowej – rysunek 2.

Obliczenia mocy elektrycznej bloku dla danej struktury wymienników muszą być wykonane dla co najmniej kilku kompletów wartości strumieni, pokrywających z relatywnie małym krokiem czasowym cały obszar rocznego uporządkowanego wykresu zapotrzebowania na ciepło grzejne. Wyliczanie mocy dla każdego z tych kompletów jest konieczne, ma na celu wyznaczenie rocznej produkcji energii elektrycznej w bloku. Wartość ta jest wielkością wejściową do obliczeń efektywności ekonomicznej jego eksploatacji.

Obliczenia mocy elektrycznej bloku dla każdego zbioru danych wejściowych wymagają iteracji. Wynika to z odstępstwa turbiny od jej nominalnych warunków pracy (oznaczonych indeksem „n" w równaniu (2); wielkości aktualnego przepływu przez poszczególne stopnie turbiny w tym równaniu nie mają żadnych indeksów; ciśnienia aktualne w upustach przed i za poszczególnymi stopniami oznaczone są kolejno jako p_p i p_k) w wyniku poborów pary do wymienników ciepłowniczych (z tych samych powodów, tj. w wyniku zmian ciśnień w upustach turbiny, iteracyjnej korekcji z wykorzystaniem warunków $\dot{Q}_{XC1}$ = const, $\dot{Q}_{XC2}$ = const, $\dot{Q}_{XC3}$ = const podlegają również wartości wejściowych strumieni pary grzejnej $\dot{m}_{39}$, $\dot{m}_{40}$, $\dot{m}_{41}$).

W pierwszym kroku iteracji dla przyjętych danych wejściowych wyznacza się za pomocą modelu matematycznego m.in. strumienie pary przepływające przez poszczególne stopnie turbiny.



Rys. 4.
Schemat blokowy algorytmu obliczeń optymalnej struktury wymienników ciepłowniczych

Następnie wykorzystując wyliczone strumienie oblicza się za pomocą równania przelotowości turbiny Stodoli-Flügla (obrazującego zmiany ciśnienia w upustach powstające pod wpływem zmian natężenia przepływającego strumienia pary wodnej) [4]:

$$p_p = \sqrt{\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_n}\right)^2 \left(p_{n,p}^2 - p_{n,k}^2\right) + p_k^2} \qquad (2)$$

nowy rozkład ciśnień w turbinie, rozpoczynając od ostatniej grupy stopni części NP turbiny (jako pierwsze w tym celu wyliczane jest za pomocą iteracji ciśnienie nasycenia p_6 w skraplaczu z wykorzystaniem jego bilansu energii i zależności $\dot{Q}_{skr} = (kF\Delta T_{\log})_{skr}$), poprzez część SP dochodząc do części WP, gdzie jako ostatnie zostaje wyliczone ciśnienie przy dopływie do części WP turbiny. Przepływem nominalnym $\dot{m}_n$ w równaniach Stodoli-Flügela dla poszczególnych stopni są wartości strumieni pary dla pracy bloku bez skojarzenia, tj. bez poborów pary do wymienników ciepłowniczych. Dla nowych wartości ciśnień i nowych wartości sprawności wewnętrznych turbiny η_{iWP}, η_{iSP}, η_{iNP} (wyliczonych za pomocą charakterystyk sprawności i dopływających do części WP, SP i NP strumieni pary z danego kroku iteracji) wyznacza się nowe wartości entalpii właściwych pary i skroplin, które wykorzystuje się w kroku następnym (jak już zaznaczono, przy każdorazowym wyliczaniu entalpii zawsze niezmienne są temperatury T_1 i T_4). W kroku tym wyznacza się kolejne nowe strumienie pary i skroplin. Następnie wykorzystując je oblicza się kolejny nowy rozkład ciśnień w turbinie itd., aż do osiągnięcia założonej dokładności obliczeń.

W drugim i kolejnych krokach iteracji temperatury skroplin za wymiennikami ciepła regeneracji nisko- i wysokociśnieniowej oraz, jak już zaznaczono, temperatury nasycenia w skraplaczach wyznacza się z wykorzystaniem równania na strumień ciepła wymienionego w wymienniku: $\dot{Q} = kF\Delta T_{\log}$, gdzie $\Delta T_{\log}$ oznacza średnią logarytmiczną różnicę temperatur dopływających do niego czynników.

Wartość iloczynu współczynnika przenikania ciepła i powierzchni grzejnej *kF* w tym równaniu dla poszczególnych wymienników należy wyznaczyć z bilansu energii przy wykorzystaniu znanych z gwarancyjnych pomiarów wartości strumieni masowych oraz parametrów termodynamicznych dopływających do nich pary i wody w warunkach pracy bloku z obciążeniem nominalnym w układzie bez skojarzenia [9].

W obliczeniach optymalizacyjnych można przyjąć, że tak wyliczone wartości iloczynów *kF* są niezmienne w całym zakresie zmienności strumieni wody i pary oraz ich charakterystycznych parametrów w układzie pracy bloku ze skojarzeniem.

Wyliczona w ostatnim kroku iteracji moc elektryczna bloku oraz strumień energii chemicznej spalanego w kotle węgla są wielkościami poszukiwanymi.

Wykorzystując wyznaczone moce elektryczne i strumienie energii chemicznej węgla dla każdego z kompletów danych wejściowych należy wyliczyć roczną produkcję energii elektrycznej w bloku i roczne zużycie w nim węgla.

Obliczenia rocznych wartości należy wykonać dla wszystkich struktur zabudowy wymienników, aby można było porównać ich efektywność ekonomiczną i wybrać wariant o największej wartości *NPV* (wzór (1)).

Na tym proces obliczeń termodynamicznych zostaje zakończony i należy przystąpić do obliczeń ekonomicznych, dla których danymi wielkościami wejściowymi, oprócz nakładów inwestycyjnych, rocznych produkcji energii elektrycznej i ciepła, rocznego zużycia energii chemicznej węgla, są: ceny nośników energii, taryfy opłat ekologicznych, stopa dyskonta, odległość odbiorców ciepła od elektrowni (co umożliwia określenie ekonomicznie opłacalnej odległości przesyłania ciepła) itd. (wzór (1)).

Dla optymalnego wariantu, tj. wariantu w którym osiągana jest największa wartość *NPV*, należy powtórzyć obliczenia ze zwiększonym spalaniem węgla w kotle przywracającym blokowi jego początkową moc elektryczną. Można oczekiwać, że w tej sytuacji ekonomiczna efektywność jego pracy będzie większa [1]. Uzyskuje się bowiem wówczas obniżenia jednostkowego kosztu produkcji ciepła, które po pominięciu jako wartości małej przyrostu opłat za zanieczyszczanie środowiska naturalnego związanych z dodatkową ilością energii chemicznej spalanego rocznie węgla wyraża się wzorem [1]:

$$\Delta k_c = \varepsilon\left(e_{el} - \frac{e_{pal}}{\eta_{Eel}}\right), \qquad (3)$$

gdzie:

e_{el}, e_{pal} – oznaczają kolejno jednostkową (na jednostkę energii) cenę sprzedaży energii elektrycznej i cenę zakupu węgla,

ε – stosunek zmniejszenia produkcji energii elektrycznej do ilości ciepła grzejnego,

η_{Eel} – sprawność energetyczną elektrowni.

LITERATURA

[1] Bartnik R., Buryn Z.: Metodyka doboru optymalnych struktur cieplnych przystosowujących zawodowe elektrownie węglowe do pracy skojarzonej. *Energetyka* 2007, nr 10

[2] Bartnik R.: Metodyka analizy i wyceny wartości prywatyzowanych elektrowni i elektrociepłowni oraz rynku ciepła i energii elektrycznej przez nie zasilanego. *Energetyka* 2005, nr 9

[3] Bartnik R.: Analiza termodynamiczna i ekonomiczna modernizacji energetyki cieplnej z wykorzystaniem technologii gazowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, nr 943, Łódź 2004

[4] Chmielniak T.: Turbiny cieplne. Podstawy teoretyczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998

[5] Głodek E.: Energetyczne i ekologiczne aspekty wprowadzenia skojarzenia w bloku energetycznym. Praca doktorska. Pol. Opolska, Wydz. Mechaniczny, 2004

[6] Mańkowski S.: Wybór źródeł ciepła dla m. Opole. Perspektywa lat 2010–2020. *Energetyka* 1998, nr 2

[7] Plebankiewicz M., Wilgusiewicz W.: O problemach wyboru źródeł ciepła dla Opola. *Energetyka* 1998, nr 3

[8] Szargut J.: Zagadnienie doboru źródeł ciepła dla Opola. *Energetyka* 1998, nr 7

[9] Sprawozdanie z pomiarów eksploatacyjnych głównych parametrów pracy bloku energetycznego nr 4 w *BOT Elektrownia Opole SA*, 2005. *ZPBE Energopomiar Gliwice* – praca niepublikowana