

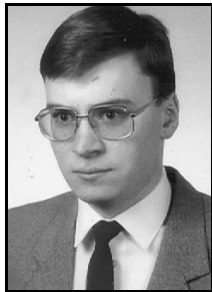
**Mirosław GAJER**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE, KATEDRA AUTOMATYKI  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

## Sterowanie pracą hydroelektrowni z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego

Dr inż. Mirosław GAJER

Jest absolwentem Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie. W 1996 roku uzyskał stopień magistra inżyniera w dyscyplinie Elektronika. W roku 2000 uzyskał stopień naukowy doktora w dyscyplinie Informatyka. Od roku 2001 jest zatrudniony w Katedrze Automatyki AGH na stanowisku adiunkta. Jego obszar zainteresowań badawczych koncentruje się głównie wokół systemów sztucznej inteligencji, obliczeń równoległych oraz zagadnień przetwarzania języka naturalnego.



e-mail: mgajer@ia.agh.edu.pl

### Streszczenie

W artykule rozważono możliwość wykorzystania techniki obliczeniowej opartej na zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych w celu optymalizacji pracy elektrowni wodnej. Założono, że rozważana elektrownia wodna, oprócz stałego dopływu wody z rzeki, dodatkowo wyposażona jest również w człony pompowe, za pomocą których można w okresie niskiego zapotrzebowania na energię elektryczną tłoczyć wodę ze zbiornika retencyjnego do zbiornika głównego elektrowni, gromadząc w ten sposób energię potencjalną mas wodnych, którą można następnie wykorzystać do produkcji energii elektrycznej w okresie występowania szczytu zapotrzebowania, czyli wtedy, gdy koszty wytworzenia energii w klasycznych elektrowniach ciepłych są relatywnie najwyższe. Przedstawione w artykule wyniki symulacji komputerowych wskazują, że algorytmy ewolucyjne można z powodzeniem wykorzystać do realizacji rozważanego zagadnienia optymalizacyjnego, dzięki czemu są w stanie zagwarantować odpowiednio niskie dobowe koszty produkcji energii elektrycznej przy jednoczesnym spełnieniu wszelkich koniecznych ograniczeń nałożonych na pracę systemu elektroenergetycznego. Dodatkowo gwarantują one zbilansowanie zbiornika elektrowni wodnej w dobowym przedziale czasowym.

**Słowa kluczowe:** systemy ewolucyjne, systemy elektroenergetyczne, hydroelektrownie, optymalizacja.

## Controlling a hydropower plant with use of evolutionary algorithm

### Abstract

The paper discusses implementation of a computational technique based on evolutionary algorithms for the purpose of optimisation of hydropower plant work. There is assumed that a hydropower plant is situated on a river that delivers water into a reservoir. The hydropower plant is additionally equipped with pumping units by means of which the water can be stored in the main reservoir during the periods of low power demand. In the next stage, the potential energy of the pumped water can be converted again into electrical energy during the periods of high power demand. The fitness function for the evolutionary algorithm is defined by the equation (5) and it takes into account the cost of burnt fuel, the balance of power in the energetic system, and the balance of water in the reservoir. The paper is divided into four sections. Section 1 is short introduction to the problems of energetic system optimisation. Section 2 describes in detail the energetic system to be optimised. The system is composed of one large thermal power unit and one hydropower plant with pumping units. The changes of power demand in the energetic system are presented in Table 1; Table 2 provides the parameters of the thermal unit. In Section 3 there are given the results of numerical experiments obtained by use of the evolutionary algorithm. Figure 1 shows the plot of power changes of the thermal unit. It can be noted that the thermal unit power for most time is as low as possible, which guarantees low cost of burnt fuel. The thermal unit power grows only during the period of high power demand in order to fulfill the balance of power in the energetic system. Figure 2 is a diagram illustrating the mode of the hydropower plant operation. It can be noted that the hydropower plant operates in the pumping mode only during the hours of the lowest power demand. The results of computer simulations presented

in the paper show that evolutionary algorithms can be effectively used for solving the optimisation task for energetic systems. Moreover, evolutionary algorithms can guarantee low cost of production of electrical energy, when simultaneously meeting all the constraints connected with necessity of balancing the power in the energetic system and balancing the amount of water in the hydropower plant reservoir.

**Keywords:** evolutionary systems, energetic systems, hydropower plants, optimization.

## 1. Wprowadzenie

Obecnie systemy ewolucyjne wykorzystywane są coraz częściej w celu rozwiązywania wszelkiego typu zagadnień optymalizacyjnych [1 – 4]. W szczególności rozważane techniki obliczeniowe okazują się niezwykle użyteczne w przypadku rozwiązywania problemów charakteryzujących się wielomodalną postacią funkcji celu, a także w przypadku zagadnień optymalizacji wielokryterialnej [5 – 7]. Ponadto algorytmy ewolucyjne wykorzystywane są do modelowania przebiegu biologicznej ewolucji w tzw. systemach obliczeniowych typu Artificial Life, dzięki czemu przyczyniają się do lepszego i głębszego poznania natury procesów leżących u podstaw zjawisk związanych z ewolucją organizmów żywych [8 – 11].

Artykuł niniejszy stanowi propozycję zastosowania techniki obliczeniowej bazującej na algorytmach ewolucyjnych w celu przeprowadzenia optymalizacji sposobu współpracy hydroelektrowni z systemem elektroenergetycznym. W celu uproszczenia rozważań, jednakże nie tracąc niczego na ogólności uzyskanych rezultatów, założono, że podstawowe zapotrzebowanie na moc elektryczną w rozważanym systemie elektroenergetycznym pokrywane jest za pomocą jednej dużej elektrowni ciepłej opalanej paliwem kopalnym (na przykład węglem kamiennym bądź brunatnym). Ponadto założono, że w rozważanym systemie elektroenergetycznym znajduje się dodatkowo jedna duża hydroelektrownia zbiornikowa, do której woda dostarczana jest w sposób ciągły z rzeki. Oprócz zbiornika głównego, w którym woda jest sztucznie spiętrzona za pomocą zapory, rozważana hydroelektrownia posiada zbiornik retencyjny, który przejmuje zrzut wody z zapory w czasie pracy turbin wodnych. Takie nagromadzenie wody w zbiorniku retencyjnym umożliwia dodatkowe wyposażenie elektrowni wodnej w człony pompowe, za pomocą których możliwe jest ponowne przepompowanie części spuszczonej z zapory wody do zbiornika głównego elektrowni, co wykonywane jest zwykle w trakcie trwania nocnej doliny obciążenia, gdy zapotrzebowanie na energię elektryczną w systemie utrzymuje się na niskim poziomie. Zatem energia elektryczna jest magazynowana w postaci energii potencjalnej mas wodnych, a następnie w czasie trwania wieczornego szczytu obciążenia jest odzyskiwana ponownie z określoną sprawnością [12].

W rozważanym przypadku celem optymalizacji było wyznaczenie dla każdej godziny doby (oczywiście przy znanym zapotrzebowaniu na moc w systemie elektroenergetycznym) mocy, z jaką powinna pracować elektrownia ciepła, aby koszt spalonego w niej paliwa w ciągu doby był możliwie jak najniższy. Ponadto dla każdej godziny doby należało ustalić, w jakim trybie pracy (pompowym czy generatorowym) powinna pracować hydroelektrownia. Należało także ustalić wartość mocy oddawanej do systemu elektroenergetycznego przez hydroelektrownię, alternatywnie należało ustalić wartość mocy pobieranej z systemu energetycznego przez człony pompowe hydroelektrowni [13].

Podczas obliczeń dodatkowo uwzględnione zostały liczne ograniczenia nałożone na pracę systemu elektroenergetycznego, do których należy m. in. wymóg nie przekraczania wartości minimalnej i maksymalnej mocy, z jaką może pracować elektrownia cieplna. Ponadto należało uwzględnić maksymalną wartość mocy, jaką do sytemu elektroenergetycznego mogą oddawać generatory napędzane turbinami wodnymi i maksymalną wartość mocy pobieranej przez człony pompowe hydroelektrowni. Dodatkowo należało uwzględnić fakt, że w dowolnym momencie pracy systemu elektroenergetycznego spełnione musiało być równanie bilansu mocy, zgodnie z którym suma mocy wytworzonych we wszystkich elektrowniach musi zawsze równać się sumie mocy pobieranej przez odbiorców i mocy strat przesyłowych. Kolejnym ograniczeniem był wymóg spełnienia, w przypadku zbiornika górnego hydroelektrowni, warunku zbilansowania mas wodnych w dobowym przedziale czasowym, co polega na tym, że objętość wody wypuszczonej ze zbiornika głównego elektrowni w ciągu doby musi równać się objętości wody, która do niego w rozważanym okresie czasu napłynęła z rzeki lub została przepompowana ponownie z jej dolnego zbiornika retencyjnego [14].

Jak wynika z przedstawionej powyżej analizy, poszukiwanie optymalnego harmonogramu pracy urządzeń wytwórczych systemu elektroenergetycznego, w sensie minimalizacji zużytego w ciągu doby w elektrowni ciepłej paliwa, jest złożonym zagadnieniem optymalizacyjnym z licznymi ograniczeniami nałożonymi na zbiór dopuszczalnych rozwiązań. Z tego powodu zastosowanie do rozwiązania rozważanego zagadnienia techniki obliczeniowej opartej na algorytmach ewolucyjnych wydaje się w pełni uzasadnione.

## 2. Założenia dla systemu symulacyjnego

W celu weryfikacji przydatności i sprawdzenia skuteczności techniki obliczeniowej opartej na algorytmach ewolucyjnych do optymalizacji harmonogramów pracy urządzeń wytwórczych systemu elektroenergetycznego, w trakcie prowadzonych przez autora symulacji, poddano analizie przykładowy system elektroenergetyczny, dla którego wykonano następnie odpowiednie symulacje komputerowe. Jednak na samym początku należało przyjąć stosowne założenia dotyczące parametrów technicznych symulowanych elementów składowych rozważanego systemu elektroenergetycznego.

W tab. 1 zamieszczono przyjęte podczas symulacji numerycznych wartości zapotrzebowania na moc elektryczną  $P_d$  zgłaszanego przez odbiorców w poszczególnych godzinach doby. Podane w tab. 1 wartości są czysto hipotetyczne, jednak kształt krzywej przedstawiającej zmiany zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym jest zbliżony do tego, jaki występuje na przykład w warunkach polskich [12, 13].

W każdej chwili pracy systemu elektroenergetycznego musi być spełniony warunek jego zbilansowania, który można wyrazić następującym równaniem [13]:

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_d + \sum_{i=1}^N s_i P_i^2, \quad (1)$$

gdzie:  $P_i$  – moc wprowadzana do systemu elektroenergetycznego przez  $i$ -tą elektrownię;  $P_d$  – zapotrzebowanie mocy przez odbiorców;  $s_i$  – współczynnik strat przesyłowych dla  $i$ -tej elektrowni;  $N$  – liczba elektrowni ciepłych.

W tab. 2 zamieszczono wartości podstawowych parametrów technicznych charakterystycznych dla elektrowni ciepłej zainstalowanej w analizowanym systemie elektroenergetycznym. Podane w tab. 2 wartości parametrów  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $s$  mają wartości hipotetyczne, jednak ich rząd wielkości jest zgodny z wartościami występującymi w przypadku rzeczywistych systemów elektroenergetycznych [12, 13].

Tab. 1. Zestawienie wartości zapotrzebowania na moc elektryczną w kolejnych godzinach doby

Tab. 1. Values of power demand at consecutive times

Godzina doby	Wartość zapotrzebowania na moc [MW]
1 <sup>00</sup>	1300
2 <sup>00</sup>	1100
3 <sup>00</sup>	1200
4 <sup>00</sup>	1300
5 <sup>00</sup>	1500
6 <sup>00</sup>	1600
7 <sup>00</sup>	1800
8 <sup>00</sup>	1900
9 <sup>00</sup>	2000
10 <sup>00</sup>	2100
11 <sup>00</sup>	2200
12 <sup>00</sup>	2300
13 <sup>00</sup>	2400
14 <sup>00</sup>	2200
15 <sup>00</sup>	2100
16 <sup>00</sup>	2300
17 <sup>00</sup>	2400
18 <sup>00</sup>	2600
19 <sup>00</sup>	2700
20 <sup>00</sup>	2500
21 <sup>00</sup>	2300
22 <sup>00</sup>	2000
23 <sup>00</sup>	1800
24 <sup>00</sup>	1500

Tab. 2. Zestawienie wartości parametrów elektrowni ciepłej

Tab. 2. Values of the thermal power unit parameters

$P_{MIN}$ [MW]	$P_{MAX}$ [MW]	$a$	$b$	$c$	$s$
1500	2000	2,82	0,466	0,00473	0,0000872

W kolumnie pierwszej i drugiej tab. 2 podano odpowiednio minimalne i maksymalne wartości mocy, z jaką może pracować rozważana elektrownia cieplna.

Koszt godziny pracy elektrowni ciepłej z mocą  $P$  jest funkcją nieliniową, która dla potrzeb obliczeniowych aproksymowana jest następującą funkcją kwadratową [13]:

$$K = a + b \cdot P + c \cdot P^2, \quad (2)$$

gdzie:  $K$  – koszt godziny pracy elektrowni ciepłej z mocą  $P$ ;  $P$  – moc, z jaką pracuje elektrownia;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – współczynniki funkcji kosztu pracy elektrowni ciepłej.

Występujące we wzorze (2) współczynniki  $a$ ,  $b$  i  $c$  posiadają wartości uzależnione od parametrów konstrukcyjnych bloków energetycznych oraz rodzaju użytego w danej elektrowni ciepłej paliwa. Wartości rozważanych współczynników dla analizowanej elektrowni ciepłej zostały zamieszczone w kolejnych kolumnach tab. 2. Natomiast w ostatniej kolumnie tab. 2 podana została wartość współczynnika mocy strat przesyłowych  $s$ , która związana jest głównie z parametrami technicznymi i topologią połączeń linii przesyłowych wykorzystanych do wyprowadzenia mocy z rozważanej elektrowni ciepłej.

Dodatkowo założono, że w badanym systemie elektroenergetycznym zainstalowana została elektrownia wodna. Na potrzeby symulacji komputerowych założono, że zbiornik wodny rozważanej hydroelektrowni jest zasilany z rzeki, której przepływ przyjęto na poziomie 540 m<sup>3</sup>/s. Natomiast wysokość zapory przyjęto, że wynosi 100 m. Z kolei sprawność przetwarzania energii potencjalnej mas wodnych na energię elektryczną ustalono jako równą 90%. Ponadto założono, że maksymalna wartość mocy oddawanej przez elektrownię wodną do systemu elektroenergetycznego wynosi 1000 MW. W związku z powyższym w przypadku rozważanej elektrowni wodnej obowiązuje następujące równanie [12]:

$$P_w = Q\rho gh\eta, \quad (3)$$

gdzie:  $Q$  – łączna wartość tzw. przeloty turbin wodnych, czyli objętość wody, jaka przepływa przez nie w jednostce czasu [m<sup>3</sup>/s];  $\rho$  – gęstość wody, równa 1000 [kg/m<sup>3</sup>];  $g$  – przyspieszenie ziemskie, równe 9,8 [m/s<sup>2</sup>];  $h$  – wysokość zapory, równa 100 [m];  $\eta$  – sprawność przetwarzania energii potencjalnej mas wodnych na energię elektryczną, równa 0,9;  $P_w$  – wartość mocy oddawanej do systemu elektroenergetycznego przez elektrownię wodną.

Do celów obliczeniowych założono, że maksymalna wartość mocy pobieranej z systemu elektroenergetycznego przez człony pompowe elektrowni wodnej będzie równa 500 MW. Pracę członów pompowych elektrowni wodnej opisuje następujące równanie [12]:

$$P_p\eta_p = Q_p\rho gh, \quad (4)$$

gdzie:  $Q_p$  – łączna wartość wydajności pomp wodnych, czyli objętość wody, jaka tłoczona jest przez nie w jednostce czasu [m<sup>3</sup>/s];  $\rho$  – gęstość wody, równa 1000 [kg/m<sup>3</sup>];  $g$  – przyspieszenie ziemskie, równe 9,8 [m/s<sup>2</sup>];  $h$  – wysokość zapory, równa 100 [m];  $\eta_p$  – sprawność przetwarzania energii elektrycznej na energię potencjalną mas wodnych, równa 0,85;  $P_p$  – wartość mocy pobieranej z systemu elektroenergetycznego przez człony pompowe elektrowni wodnej.

Przyjęte na potrzeby symulacji komputerowych parametry hydroelektrowni są czysto hipotetyczne, jednak ich wartości są zbliżone do wartości charakterystycznych dla realnie istniejących tego typu obiektów, na przykład elektrowni szczytowo-pompowej Porąbka-Żar [14].

### 3. Wyniki symulacji numerycznych

W celu wyznaczenia harmonogramu pracy urządzeń systemu elektroenergetycznego, charakteryzującego się możliwie najniższym dobowym kosztem paliwa spalonego w elektrowni ciepłej, zastosowano algorytm ewolucyjny, w przypadku którego populacja składała się ze 100 osobników, które podawane były systematycznie operacjom mutacji oraz selekcji. Przyjęta liczebność populacji osobników jest typową wartością spotykaną powszechnie w literaturze przedmiotu [1 - 4].

Koszt tony paliwa jest co prawda stały i jest on rezultatem kontraktów terminowych podpisanych pomiędzy rozpatrywaną elektrownią a daną spółką węglową, ale ilość paliwa spalonego w elektrowni w jednostce czasu jest zmienna i wzrasta w sposób nieliniowy wraz ze wzrostem mocy, z jaką pracuje dana elek-

rownia [12, 13]. Z tego powodu należy w miarę możliwości unikać sytuacji, w których elektrownia pracuje na poziomie mocy bliskiej swej mocy maksymalnej, ponieważ w takiej sytuacji koszty spalonego w jednostce czasu paliwa są bardzo wysokie.

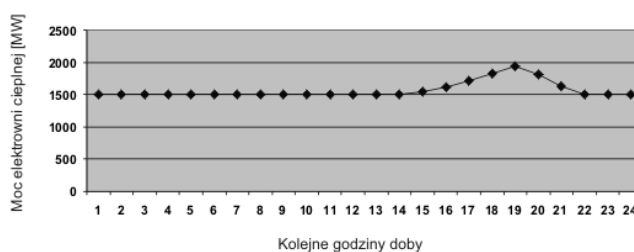
Rozwiązania kodowane były na poszczególnych genach osobników z bezpośrednim wykorzystaniem liczb rzeczywistych. W związku z tym realizacja operacji mutacji polegała na dodaniu do losowo wybranego genu pewnej losowej dodatniej bądź ujemnej wartości. Operacja selekcji została zrealizowana jako turniejowa, która była przeprowadzana w ten sposób, że osobniki były łączone losowo w pary, a następnie z każdej takiej pary do kolejnego pokolenia przechodził jedynie ten osobnik, który posiadał korzystniejszą wartość funkcji dopasowania. Natomiast funkcja dopasowania została zdefiniowana za pomocą następującego wzoru:

$$f = \sum_{i=1}^{24} (a + bP_i + cP_i^2) + \sum_{i=1}^{24} (P_i + H_i - P_d - sP_i^2)^2 + \left( 86400Q + \sum_{i=1}^{24} V_i \right)^2 \quad (5)$$

gdzie:  $P_i$  – moc elektrowni ciepłej w godzinie  $i$ -tej;  $H_i$  – moc hydroelektrowni w godzinie  $i$ -tej;  $P_d$  – zapotrzebowanie mocy przez odbiorców;  $V_i$  – objętość wody przepuszczonej przez pompo-turbiny hydroelektrowni;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – współczynniki funkcji kosztu pracy elektrowni ciepłej;  $s$  – współczynnik strat przesyłowych.

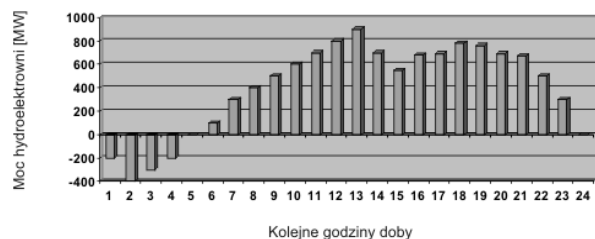
Pierwszy składnik wzoru (5) określa całkowity, dobowy koszt spalonego w elektrowni ciepłej paliwa, który powinien być możliwie jak najmniejszy. Drugi ze składników funkcji dopasowania jest składnikiem kary nakładanej za naruszenie bilansu mocy w systemie, przy czym  $H_i$  oznacza moc oddawaną do systemu elektroenergetycznego przez hydroelektrownię w sytuacji, gdy pracuje ona w trybie pracy generatorowej (wartości dodatnie), lub moc pobieraną przez nią w sytuacji, gdy pracuje w trybie pracy pompowej (wartości ujemne). Z kolei trzeci ze składników wzoru (5) stanowi również karę nakładaną za naruszenie bilansu zbiornika wodnego hydroelektrowni, przy czym  $V_i$  oznacza objętość wody spuszczonej (wartości ujemne) lub wpompowanej do zbiornika za pomocą urządzeń hydroenergetycznych elektrowni (wartości dodatnie). W idealnym przypadku oba składniki kary powinny być równe zero w przypadku dokładnego zbilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym o każdej godzinie doby i całkowitego zbilansowania ilości wody napływającej i spuszczonej ze zbiornika hydroelektrowni w dobowym przedziale czasowym. Ponieważ uzyskanie idealnego zbilansowania zarówno mocy, jak i objętości wody nie jest w praktyce możliwe, dlatego należy dążyć jedynie do tego, aby wymienione czynniki kary przybierały wartości możliwie jak najmniejsze. Reasumując, należy stwierdzić, że ostatecznym celem zastosowania algorytmu ewolucyjnego było zminimalizowanie wartości funkcji dopasowania zadanej wzorem (5).

W wyniku realizacji algorytmu ewolucyjnego otrzymano plan pracy elektrowni ciepłej, który został zilustrowany za pomocą wykresu zamieszczonego na rys. 1



Rys. 1. Zmiany mocy elektrowni ciepłej w przedziale czasowym jednej doby  
Fig. 1. Changes of the thermal unit power level in the 24-hour time horizon

Z kolei sposób pracy hydroelektrowni został zilustrowany za pomocą wykresu słupkowego zamieszczonego na rys. 2.



Rys. 2. Zmiany mocy hydroelektrowni w przedziale czasowym jednej doby  
Fig. 2. Changes of the hydropower unit power level in the 24-hour time horizon

#### 4. Wnioski

Jak wynika z rezultatów przeprowadzonych symulacji numerycznych, technika obliczeniowa oparta na zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych okazała się być skutecznym narzędziem optymalizacyjnym, pozwalającym na uzyskiwanie planów produkcji energii elektrycznej odznaczających się niskimi kosztami paliwa spalonego w elektrowni ciepłej.

O dobrej jakości rozwiązania uzyskanego za pomocą algorytmu ewolucyjnego świadczą wyniki, które zilustrowano w postaci wykresu zamieszczonego na rys. 1. Z przedstawionej zależności wynika, że rozważana elektrownia ciepła przez większą część doby pracuje na poziomie swej mocy minimalnej, wynoszącej 1500 MW, co gwarantuje możliwie najniższe koszty spalonego w tym okresie paliwa. Większe obniżenie mocy elektrowni nie jest możliwe, ponieważ nie pozwalają na to jej parametry technologiczne. Jak wynika z rys. 1, jedynie w okresie wieczornego szczytu zapotrzebowania moc elektrowni ciepłej wzrasta, osiągając o godz. 19<sup>00</sup> maksymalną wartość, wynoszącą około 1950 MW. Wówczas ilość spalonego w jednostce czasu paliwa również wzrasta (w dodatku nieliniowo) wraz ze wzrostem mocy elektrowni, ale trzeba zaznaczyć, że jest to konieczność, wynikająca ze wzrostu zapotrzebowania na moc zgłaszanego ze strony odbiorców.

Analogicznie na wykresie zamieszczonym na rys. 2 można zaobserwować, że hydroelektrownia pracuje w trybie pompowym jedynie podczas nocnej doliny obciążenia, występującej od godz. 1<sup>00</sup> do godz. 4<sup>00</sup>. W rozważanym wypadku tryb pracy pompowej hydroelektrowni, podczas której pobiera ona moc z systemu elektroenergetycznego, został wymuszony koniecznością zbilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym w sytuacji, gdy zapotrzebowanie na moc zgłaszane ze strony odbiorców spada poniżej wartości 1500 MW, czyli poniżej dolnej granicy dopuszczalnego zakresu mocy, z jaką może pracować elektrownia ciepła. W takiej sytuacji jedynym możliwym do zastosowania rozwiązaniem jest odebranie nadwyżki mocy występującej w systemie elektroenergetycznym poprzez uruchomienie członów pompowych hydroelektrowni.

Reasumując, uzyskane za pomocą algorytmu ewolucyjnego rezultaty charakteryzują się bardzo dobrym poziomem zbilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym i odpowiednim dobowym poziomem zbilansowania zbiornika wodnego hydroelektrowni. Podczas symulacji komputerowych bilans mocy w systemie elektroenergetycznym nie przekraczał nigdy wartości +/- 1% mocy elektrowni ciepłej. Jest to niezwykle istotne, ponieważ zapewnienie właściwego zbilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym jest warunkiem koniecznym do jego poprawnej pracy. Również zbilansowanie zbiornika wodnego było podczas symulacji utrzymywane na poziomie nie przekraczającym +/- 100 tys. m<sup>3</sup>. Taka wartość zapewnia utrzymanie lustra wody na

prawie stałym poziomie i zapobiega nadmiernemu opróżnieniu bądź przepełnieniu zbiornika. Dlatego technika obliczeniowa oparta na systemach ewolucyjnych może stanowić skuteczne narzędzie pozwalające na przeprowadzanie optymalizacji sposobu pracy systemu elektroenergetycznego, gwarantując jednocześnie odpowiednio wysoką jakość uzyskiwanych rozwiązań w sensie obniżenia ilości paliwa zużywanego w elektrowni ciepłej w ciągu doby przy jednoczesnym zapewnieniu zbilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym i ilości wody w zbiorniku hydroelektrowni.

Należy podkreślić, że rozważany w artykule system elektroenergetyczny miał charakter czysto hipotetyczny i służył jedynie zbadaniu możliwości zastosowania techniki obliczeniowej opartej na algorytmach ewolucyjnych do optymalizacji pracy zainstalowanych elektrowni. Praktyczne wykorzystanie uzyskanych rezultatów w rzeczywistych systemach elektroenergetycznych wymagać będzie jeszcze dalszych analiz i badań symulacyjnych, podczas których należy m.in. uwzględnić dodatkowe czynniki, jakie mogą wpływać na pracę systemów elektroenergetycznych.

#### 5. Literatura

- [1] Goldberg D. E.: Algorytmy genetyczne i ich zastosowania. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [2] Arabas J.: Wykłady z algorytmów ewolucyjnych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- [3] Michalewicz Z.: Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
- [4] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Lódź 1997.
- [5] Molina D., Lozano M., Garcia-Martinez C., Herrera F.: Memetic algorithms for continuous optimization based on local search chains, *Evolutionary Computation*, vol. 18, 2010, pp. 27-63.
- [6] Elhossini A., Areibi S., Dony R.: Strength Pareto particle swarm optimization and hybride EA-PSO for multi-objective optimization, *Evolutionary Computation*, vol. 18, 2010, pp. 127-156.
- [7] Schütze O., Laumanns M., Tantar E., Coello C. A., El-Ghazali T.: Computing gap free Pareto front approximations with stochastic search algorithms, *Evolutionary Computation*, vol. 18, 2010, pp. 65-96.
- [8] Gras R., Devaurs D., Wozniak A., Aspinall A.: An individual-based evolving predator-prey ecosystem simulation using a fuzzy cognitive map as the behavior model, *Artificial Life*, vol. 15, 2009, pp. 423 – 463.
- [9] Bullinaria J. A.: Lifetime learning as a factor in life history evolution, *Artificial Life*, vol. 15, 2009, pp. 389 – 409.
- [10] Stanley K. O., D'Ambrosio D. B., Gauci J.: A hypercube-based encoding for evolving large-scale neural networks, *Artificial Life*, vol. 15, 2009, pp. 185 – 212.
- [11] Paenke I., Kawecki T. J., Sendhoff B.: The influence of learning on evolution: A mathematical framework, *Artificial Life*, vol. 15, 2009, pp. 227 – 245.
- [12] Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F.: Elektrownie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
- [13] Kremens Z., Sobierajski M.: Analiza systemów elektroenergetycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
- [14] Marecki J.: Podstawy przemian energetycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.