

Ryszard NAWROWSKI\*  
Andrzej TOMCZEWSKI\*  
Tomasz JARMUDA\*

## KONCEPCJA OPTYMALIZACJI STRUKTURY HYBRYDOWEJ ELEKTROWNI SOLARNO-WIATROWEJ

Artykuł przedstawia koncepcję optymalizacji struktury hybrydowej elektrowni solarno-wiatrowej z zastosowaniem metody algorytmu genetycznego. Przedstawione zagadnienia, związane są z wytwarzaniem energii elektrycznej z zastosowaniem współpracujących turbin wiatrowych i paneli fotowoltaicznych. W pracy scharakteryzowano metodę populacyjną algorytmu genetycznego oraz zaproponowano koncepcję optymalizacji struktury hybrydowej elektrowni solarno-wiatrowej (rozdział mocy) wraz ze zmiennymi decyzyjnymi, ograniczeniami oraz opracowaną postacią funkcji celu.

SŁOWA KLUCZOWE: optymalizacja, elektrownia hybrydowa, algorytm genetyczny

### 1. WSTĘP

Odnawialne źródła energii, takie jak wiatr i słońce mają coraz większe znaczenie w gospodarce energetycznej Unii Europejskiej. Na koniec 2012 roku łączna moc zainstalowanych ogniw słonecznych na świecie wynosiła 100 GW, natomiast turbin wiatrowych 282,5 GW. Należy jednak pamiętać, że efektywność wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach solarnych i wiatrowych jest silnie uzależniona od warunków atmosferycznych, panujących w określonej lokalizacji geograficznej.

Wiatr jest zjawiskiem stochastycznym. Jego prędkość zmienia się w czasie w szerokim zakresie, co utrudnia wykorzystanie jego potencjału energetycznego do wytworzenia energii elektrycznej. Dodatkowo, zależnie od lokalizacji geograficznej, wyróżnić można charakterystyczne cechy przebiegów prędkości wiatru. W strefie klimatycznej Polski średnia prędkość wiatru jest większa w miesiącach jesienno-zimowych, niż w pozostałych okresach roku. Podobnie wyższe wartości, energia wiatru posiada zazwyczaj w nocy niż w ciągu dnia.

W przypadku promieniowania słonecznego ważnym czynnikiem wpływającym na wielkość generowanej energii jest cykl dobowy. Panele fotowoltaiczne wytwarzają energię tylko w dzień, a na ograniczenie ich zdolności wytwórczej

---

\* Politechnika Poznańska.

mają wpływ dodatkowo niekorzystne warunki meteorologiczne jak np. zachmurzenie. Również w okresie rocznym obserwowane są deterministyczne trendy zmian średniomiesięcznej gęstości promieniowania słonecznego.

Rozwiązaniem umożliwiającym częściową likwidację negatywnych cech losowej zmienności energii wiatru i słońca jest budowa hybrydowej elektrowni solarno-wiatrowej. Odpowiednio zaprojektowana struktura wykorzystuje przeciwstawne trendy deterministyczne zmian energii wiatru i słońca w okresie roku i doby. Ustalenie optymalnej struktury elektrowni możliwe jest na drodze doboru odpowiednich urządzeń (rozdział mocy na część wiatrową i solarną) oraz algorytmów jej pracy. W tym celu możliwe jest stosowanie wielu technik, przy czym najwyższą efektywność można uzyskać z wykorzystaniem odpowiednio skonstruowanego algorytmu optymalizacyjnego.

## 2. ELEKTROWNIE HYBRYDOWE

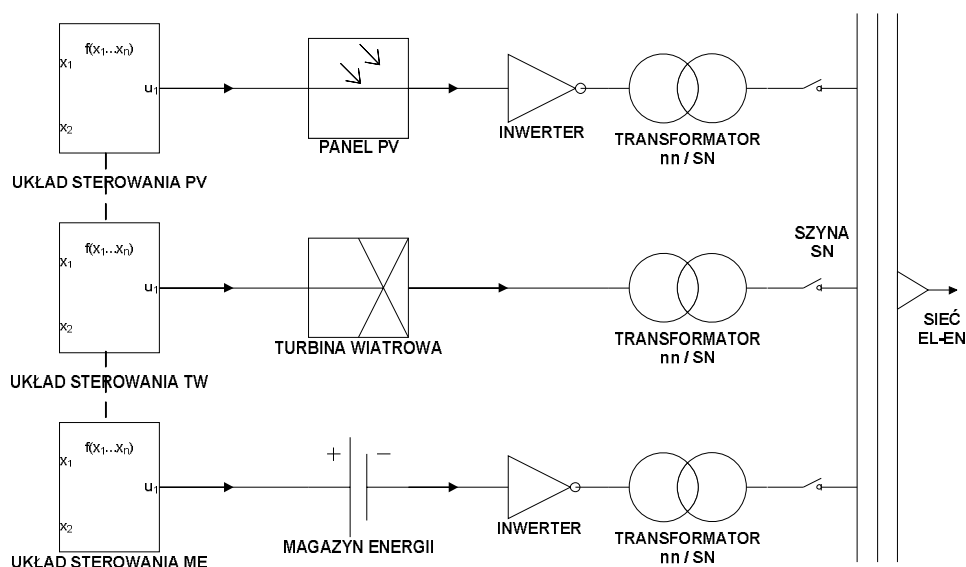
Elektrownie wykorzystujące jeden typ odnawialnego źródła energii są silnie uzależnione od czynników klimatycznych. Powoduje to okresowość produkcji energii elektrycznej i związany z tym udarowy przebieg mocy wyjściowej układu. Rozwiązaniem łagodzącym wymieniony efekt mogą okazać się elektrownie hybrydowe. Na ile rozwiązanie będzie skuteczne, zależy od wyboru typów źródeł wchodzących w jej skład, a także od szczegółowej struktury układu, szczególnie procentowego udziału mocy poszczególnych źródeł oraz wykorzystania systemów magazynowania energii.

Według rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 18 października 2012 r., układem hybrydowym jest jednostka wytwórcza, wytwarzająca energię elektryczną albo energię elektryczną i ciepło. W prezentowanym artykule przedstawiono strukturę systemu hybrydowego podwójnego (z dwoma rodzajami zastosowanych technologii), w postaci elektrowni solarno-wiatrowej. Jako jedną z zalet tego typu systemów należy wymienić bezpieczeństwo dla środowiska naturalnego, związane z brakiem emisji zanieczyszczeń do ekosystemu [6].

Systemy hybrydowe wzajemnie kompensują wady odnawialnych źródeł energii, stosowanych do produkcji energii elektrycznej w danym układzie wytwórczym. Podjęcie ostatecznej decyzji o inwestycji w określony typ systemu, należy poprzedzić szczegółową analizą zagadnienia. Składają się na nią ocena: wydajności energetycznej, efektywności społeczno-ekologicznej oraz ekonomicznej. System hybrydowy jest bardziej opłacalny energetycznie niż elektrownie, stosujące pojedyncze odnawialne źródła energii, a dodatkowo jego zastosowanie może być przyjazne dla środowiska. Dzięki odpowiedniej strukturze systemu możemy dodatkowo dopasować produkcję energii elektrycznej do popytu, a także magazynować (kinetyczne zasobniki energii, ogniwa paliwowe i paliwowo-wodorowe, elektrownie szczytowo-pompowe, pneumatyczne zasobniki

energii, superkondensatory, nadprzewodzące zasobniki energii (SMES) oraz bateryjne zasobniki energii) nadwyżkę energii wyprodukowanej we wcześniejszych okresach [4].

Schemat blokowy struktury elektrowni solaro-wiatrowej z wydzielonymi elementami elektrowni wiatrowej i solarnej, opcjonalnymi zasobnikami energii oraz transformatorami średniego napięcia, przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Proponowana struktura elektrowni solaro-wiatrowej

Roczna ilość generowanej energii elektrycznej dla ustalonej struktury elektrowni wiatrowej może zostać wyznaczona w oparciu o średnioroczną prędkość wiatru dla danej lokalizacji geograficznej, rozkład gęstości prawdopodobieństwa Weibulla oraz krzywe mocy zastosowanych turbin wiatrowych. W przypadku elektrowni solarnej wielkość generowanej w okresie roku energii zostanie wyznaczona w oparciu o rozkład średniej gęstości mocy promieniowania dla poszczególnych miesięcy w danej lokalizacji geograficznej oraz charakterystyk prądowo - napięciowych zastosowanych paneli PV. Powyższa metoda wprowadza znaczne błędy związane z przyjęciem wartości średnich prędkości wiatru, gęstości promieniowanie itp. Najlepsze rezultaty obliczeń w tym obszarze osiągamy, wykorzystując dane pomiarowe z lokalizacji przyszłej inwestycji, z okresu co najmniej jednego roku. Pomiary takie dla przyszłych elektrowni solarnych i wiatrowych są podstawą opracowania dokumentacji projektowej i powinny stać się podstawowym elementem doboru struktury i parametrów elektrowni.

### 3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA METODY ALGORYTMU GENETYCZNEGO

Algorytm genetyczny GA (ang. genetic algorithm) to metoda optymalizacyjna wykorzystująca mechanizm doboru naturalnego oraz dziedziczenia. Łączy w sobie ewolucyjną zasadę przeżycia najlepiej przystosowanych osobników z systematyczną, choć zrandomizowaną, wymianą informacji. Swoją popularność zawdzięcza prostocie działania z równoczesnym brakiem ograniczeń nakładanych na przestrzeń poszukiwań przez konwencjonalne (deterministyczne) metody poszukiwań (wymaganie ciągłości funkcji celu, istnienie pochodnych, itd.). Metoda algorytmu genetycznego daje dobre rezultaty w zadaniach, związanych z poszukiwaniem ekstremum globalnego funkcji wielomodalnych, jest odporna na zmiany wielkości zadania, dobrze radzi sobie z dużą i bardzo dużą liczbą zmiennych decyzyjnych, a także uwzględnia ograniczenia strukturalne i funkcjonalne zadania [2].

Różnice między algorytmami genetycznymi, a metodami tradycyjnymi (deterministycznymi) są następujące:

- GA nie przetwarza bezpośrednio parametrów zadania, lecz ich zakodowaną postać,
- GA nie prowadzi poszukiwań, przetwarzając pojedynczy punkt (rozwiązanie), lecz pewną ich liczbę (tzw. populację),
- GA korzysta tylko z funkcji celu, nie zaś z jej pochodnych lub innych pomocniczych informacji,
- GA stosują probabilistyczne, a nie deterministyczne reguły wyboru, chociaż sama struktura algorytmu jest deterministyczna.

Elementami algorytmu genetycznego, które w dużej mierze decydują o efektywności metody są reprodukcja oraz operatory genetyczne. Jedną z najważniejszych części reprodukcji jest selekcja. Wśród wielu opracowanych i przebadanych jej typów (metoda ruletki, selekcja rankingowa, selekcja turniejowa, elitarna i inne), ważne miejsce zajmuje wybór losowy wg reszt bez powtórzeń o nazwie Brindle. W przypadku wielu zadań optymalizacji układów technicznych daje ona dobre rezultaty, poprawiając jakość wyników oraz szybkość ich uzyskiwania w stosunku do klasycznej postaci algorytmu [2].

W celu zapewnienia odpowiedniego poziomu konkurencji między osobnikami populacji, stosuje się mechanizmy skalowania funkcji celu. Wartości funkcji celu muszą zostać zmniejszone, by zapobiec opanowaniu populacji przez niewielką liczbę tzw. superosobników, w innych przypadkach muszą natomiast zostać zwiększone, by uwydatnić różnice między członkami populacji. Stosowane praktycznie algorytmy, nazywane skalowaniem funkcji przystosowania, obejmują metody: liniową,  $\sigma$ -obcinającą oraz potęgową [2].

## 4. KONCEPCJA OPTIMALIZACJI STRUKTURY ELEKTROWNI SOLARNO-WIATROWEJ

### 4.1. Funkcja celu, zmienne decyzyjne i ograniczenia

Podstawowym zadaniem optymalizacji elektrowni solarno-wiatrowej jest ustalenie struktury układu maksymalizującej ilość energii elektrycznej generowanej w ustalonej lokalizacji geograficznej w okresie jednego roku. Przyjęto, że wskaźnik jakości rozwiązania  $J(\mathbf{x})$  jest funkcją skalarną wektora zmiennych decyzyjnych  $\mathbf{x}$ , wiążącą energie generowane w obu segmentach elektrowni, o ogólnej postaci:

$$J(\mathbf{x}) = J_{PV}(\mathbf{x}) + J_W(\mathbf{x}) \quad (1)$$

gdzie:  $J_{PV}(\mathbf{x})$  – ilość energii elektrycznej generowanej w panelach PV,  $J_W(\mathbf{x})$  – ilość energii elektrycznej generowanej w turbinach wiatrowych.

Rozpatrywane zadanie należy do zadań z ograniczeniami. Jednym ze sposobów ich uwzględnienia jest metoda funkcji kary. Uwzględniając karę zewnętrzną zmodyfikowana funkcja celu  $J_z(\mathbf{x})$  dla rozwiązywanego zadania przyjmuje postać:

$$J_z(\mathbf{x}) = J_{PV}(\mathbf{x}) + J_W(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^N F_{k(j)} \quad (2)$$

gdzie:  $F_{k(j)}(\mathbf{x})$  – funkcja kary dla  $j$ -tego ograniczenia,  $N$  - liczba ograniczeń.

Analiza zagadnienia wykazała, że wektor zmiennych decyzyjnych  $\mathbf{x}$  posiada sześć składowych definiujących kolejno: typ paneli fotowoltaicznych PV - zmienna  $x_1$ , liczbę paneli fotowoltaicznych PV - zmienna  $x_2$ , typ turbiny wiatrowej - zmienna  $x_3$ , liczbę turbin wiatrowych - zmienna  $x_4$ , typ systemu magazynowania energii elektrycznej - zmienna  $x_5$ , liczbę magazynów energii elektrycznej - zmienna  $x_6$ .

Wybór typu stosowanych paneli PV, turbin wiatrowych i typów magazynu energii ograniczony jest do wykorzystywanej bazy danych. W ten sposób realizowany jest główny element ograniczeń strukturalnych. Dodatkowo ze względu na dyskretny zbiór dostępnych mocy paneli oraz turbin wiatrowych ustalono ograniczenie dla mocy znamionowej  $P_{NH}$  elektrowni hybrydowej zapisane w postaci znormalizowanej jako:

$$1 - \frac{(P_{NTW}(\mathbf{x})N_{TW} + P_{NPV}(\mathbf{x})N_{PV})}{p_{Min}P_{NH}} \leq 0 \quad (3a)$$

$$\frac{(P_{NTW}(\mathbf{x})N_{TW} + P_{NPV}(\mathbf{x})N_{PV})}{p_{Max}P_{NH}} - 1 \leq 0 \quad (3b)$$

gdzie:  $P_{NTW}$ ,  $P_{NPV}$  - moce znamionowe wykorzystanego typu turbin wiatrowych i paneli PV,  $N_{TW}$ ,  $N_{PV}$  - liczba turbin wiatrowych i paneli PV wschodzących w skład elektrowni solarno-wiatrowej,  $p_{Min}$  i  $p_{Max}$  - współczynniki odpowiadające dolnej i górnej granicy dopuszczalnego przedziału mocy znamionowej elektrowni solarno - wiatrowej.

Składowe funkcji celu  $J_{PI}(\mathbf{x})$  i  $J_W(\mathbf{x})$  odpowiadają energiom generowanym odpowiednio w segmencie fotowoltaicznym i wiatrowym. Metody wyznaczania ich wartości zostaną przedstawione w rozdziale 4.2 niniejszego referatu.

## 4.2. Metody wyznaczania składowych funkcji celu

### A. Energia wiatru

Ilość energii elektrycznej generowanej w elektrowni wiatrowej o określonej strukturze fizycznej może być wyznaczona kilkoma metodami. Jedną z nich jest wykorzystanie średniorocznej prędkości wiatru  $v_{wAvg}$  dla danej lokalizacji geograficznej oraz dwuparametrycznego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa Weibulla o postaci:

$$p(v_w) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{v_w}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} e^{-\left( \frac{v_w}{\beta} \right)^\gamma} \quad (4)$$

gdzie:  $\gamma$  – parametr kształtu (w warunkach polskich przyjmowany z zakresu od 1,2 do 2,2),  $\beta$  – parametr zależny od średniorocznej prędkości wiatru  $v_{wAvg}$  oraz wartości funkcji gamma Eulera [1].

W takim przypadku ilość energii elektrycznej, generowanej w okresie jednego roku, wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$A_e^w = J_W(\mathbf{x}) = 8760 \sum_0^{v_{out}} p(v_w) P_1(v_w) dv_w \quad (5)$$

gdzie:  $p(v_w)$  – prawdopodobieństwo wystąpienia prędkości wiatru  $v_w$  wynikające z rozkładu Weibulla dla określonej lokalizacji geograficznej,  $P_1(v_w)$  – moc elektrowni wiatrowej zgodnie z krzywą mocy wybranego typu turbiny.

Drugą metodą wyznaczenia wartości generowanej energii jest wykorzystanie danych pomiarowych, zazwyczaj w postaci zbioru wartości średniej prędkości wiatru dla ustalonego okresu pomiarowego  $\Delta t_W$ . W takim przypadku, dla znanej krzywej mocy turbiny  $P_1(v_w)$ , energia generowana w okresie jednego roku ( $N_1$  próbek pomiarowych) może zostać wyznaczona z zastosowaniem zależności:

$$A_e^w = J_W(x) = \sum_{n=1}^{N_1} P_1(V_{w(n)}) \Delta t_W \quad (6)$$

gdzie:  $P_1(v_{w(n)})$  – moc elektrowni wiatrowej odpowiadająca prędkości  $v_w$  dla próbki  $n$  zgodnie z krzywą mocy wybranego typu turbiny.

### B. Energia promieniowania słonecznego

Podobnie jak w przypadku turbin wiatrowych ilość energii elektrycznej generowanej w elektrowni solarnej w okresie jednego roku może być wyznaczona kilkoma metodami. Pierwszą z ich jest wykorzystanie średniomiesięcznej gęstości

mocy promieniowania słonecznego dla danej lokalizacji geograficznej oraz średniego czasu nasłonecznienia dla poszczególnych miesięcy:

$$A_e^s = J_{PV} = \sum_{n=1}^{12} P_2(E_{(n)Avg}) T_{(n)Sun} \quad (7)$$

gdzie:  $E_{(n)Avg}$  – średnia miesięczna gęstość mocy promieniowania,  $P(E_{(n)Avg})$  - moc panelu odpowiadająca gęstości  $E_{(n)Avg}$ ,  $T_{(n)Sun}$  – średni czas nasłonecznienia dla miesiąca  $n$ .

Druga metoda wykorzystuje dane pomiarowe gęstości mocy promieniowania słonecznego. Uwzględniając stały krok dyskretyzacji  $\Delta t_{PV}$  wartość energii generowanej przez panele PV, dla  $N_2$  próbek pomiarowych, wyznaczyć można z zależności:

$$A_c^s = \sum_{n=1}^{N_2} P_2(E_{(n)}) \Delta t_{PV} \quad (8)$$

gdzie:  $P(E_{(n)})$  – moc paneli PV dla próbki pomiarowej  $n$  (gęstość mocy promieniowania wynosi  $E_{(n)}$ ),  $\Delta t_{PV}$  – krok czasowy pomiarów gęstości mocy promieniowania. Moc paneli PV wyznaczana jest na drodze aproksymacji charakterystyki prądowo - napięciowej wybranego typu panelu dla odczytanej z pomiarów wartości gęstości mocy promieniowania słonecznego  $E_{(n)}$ .

### C. Wyznaczanie energii generowanej w układzie solaro-wiatrowym

Podstawowym zadaniem obliczeniowym, związanym z ustaleniem wartości zmodyfikowanej funkcji celu (2) w rozpatrywanym zadaniu optymalizacji struktury elektrowni solaro-wiatrowej, jest wyznaczenie energii generowanej w układzie w okresie jednego roku. W przypadku posiadania danych pomiarowych prędkości wiatru oraz gęstości mocy promieniowania słonecznego, energię elektryczną generowaną w omawianym układzie hybrydowym, wyznaczyć można z zależności:

$$A_e = \sum_{n=1}^{N_1-1} \frac{P_1(v_{w(n+1)}) + P(v_{w(n)})}{2} \Delta t_W + \sum_{n=1}^{N_2-1} \frac{P_2(E_{(n+1)}) + P(E_{(n)})}{2} \Delta t_{PV} \quad (9)$$

W zależności (9) uwzględniono uśrednioną wartość mocy turbiny wiatrowej  $P_1$  oraz paneli PV  $P_2$ , odpowiednio w okresach  $\Delta t_W$  i  $\Delta t_{PV}$ , wynikającą z zastosowania liniowej aproksymacji zmian mocy w czasie.

### 4.3. Wybór metody optymalizacyjnej

Ze względu na przewidywaną wielomodalną postać funkcji celu, niejawnie występowanie w funkcji celu zmiennych decyzyjnych oraz zróżnicowane typy zmiennych do rozwiązania zadania, autorzy proponują zastosowanie zmodyfikowanego algorytmu genetycznego o następującej strukturze i elementach:

- kodowanie zmiennych: metoda blokowego zapisu pozycyjnego ze standaryzacją parametrów (wektor zmiennych niezależnych  $x$  dla pojedynczego osobnika kodowany jest w postaci jednego chromosomu),
- selekcja: wybór losowy wg reszt bez powtórzeń,
- krzyżowanie: dwupunktowe,
- mutacja: równomierna,
- skalowanie funkcji przystosowania: liniowe, uwzględnienie ograniczeń: zastosowanie zewnętrznej funkcji celu metodą korekcji kar Powella-Skolnicka (z modyfikacjami Michalewicza) [3].

Jednocześnie, ze względu na szybkość realizacji zadania proponuje się, aby implementacja wyżej scharakteryzowanego algorytmu optymalizacyjnego zrealizowana została w środowisku programistyczno-symulacyjnym MATLAB&SIMULINK z zastosowaniem modułu obliczeniowego Global Optimization Toolbox. Zastosowanie pewnej grupy wymienionych powyżej elementów algorytmu GA wymaga opracowania własnych funkcji i rozszerzenia standardowej funkcjonalności dostępnej w środowisku MATLAB&SIMULINK [5].

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono koncepcję optymalizacji struktury hybrydowej elektrowni solarno-wiatrowej z zastosowaniem metody algorytmu genetycznego. Przeprowadzone rozważania doprowadziły do ustalenia:

- propozycji struktury elektrowni hybrydowej solarno-wiatrowej współpracującej z układem magazynowania energii elektrycznej, której podstawową cechą jest wzajemna kompensacja niedoborów produkcji energii elektrycznej ze źródła solarnego i wiatrowego w określonych okresach doby i roku,
- koncepcji algorytmu optymalizacji struktury hybrydowej elektrowni solarno-wiatrowej, obejmującej opracowanie postaci funkcji celu, zbioru zmiennych decyzyjnych i ograniczeń oraz wyboru metody optymalizacyjnej,
- szczegółowej postaci funkcji celu obejmującej wyznaczenie ilości energii generowanej w układzie hybrydowym na podstawie dostępnych pomiarów prędkości wiatru i gęstości mocy promieniowania słonecznego z lokalizacji przyszłej elektrowni hybrydowej.

Dalsze prace w zakresie optymalizacji rozpatrywanego układu hybrydowego powinny dotyczyć:

- ustalenia funkcji celu o charakterze techniczno-ekonomicznym umożliwiającej prowadzenie zadania minimalizacji kosztów jednostkowych wytworzenia energii elektrycznej,
- uwzględnienie magazynów energii jako elementu układu jaki pozwoli na dalsze uspokojenie źródła,



- uwzględnienia rzeczywistego charakteru dobowego zapotrzebowania na energię elektryczną,
- opracowania algorytmu symulacji pracy układu dla wymuszeń rzeczywistych,
- uwzględnienia w obliczeniach energii generowanej w układzie dynamiki zmian prędkości wiatru, temperatury pracy ogniw PV oraz zastosowania efektywnej metody aproksymacji charakterystyk prądowo-napięciowych paneli PV.

### LITERATURA

- [1] Chojnacki J., Knap T., Odnawialne i niekonwencjonalne źródła energii, Poradnik, Wydawca TARBONUS, Kraków 2008.
- [2] Goldberg D.E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
- [3] Michalewicz Z., Fogel D.B., How to Solve It: Modern Heuristics, Springer-Verlag, New York 2000.
- [4] Paska J., Generacja rozproszona z wykorzystaniem hybrydowych układów wytwórczych, Energetyka, 2013, Nr 6, s. 459.
- [5] Pratap R., MATLAB 7: dla naukowców i inżynierów, PWN, Warszawa 2007.
- [6] Stefaniak A., Systemy hybrydowe odnawialnych źródeł energii, Czysta Energia, 2013, Nr 11(147), s. 22-23.

### DESIGN STRUCTURE OPTIMIZATION OF THE HYBRID SOLAR-WIND POWER PLANT

This article presents the concept of optimization of the structure of a hybrid solar-wind power plant using the method of genetic algorithm. The issues are related to the generation of electricity using wind turbines and cooperating photovoltaic panels. The study characterized the method of population-genetic algorithm, and proposes the concept of optimization of the structure of a hybrid solar-wind power plant (power distribution) with decision variables, constraints and the developed form of the objective function.