

# REFERAT KONFERENCYJNY

## XXXI KONFERENCJA

SZKOLENIOWO-TECHNICZNA  
ELEKTROENERGETYCZNE SIECI  
KABLOWE I NAPOWIETRZNE

**KABEL**  
2026 ▲

10 – 13 marca 2026 r.

Świeradów-Zdrój Elements Hotel & Spa \*\*\*\*\*

**Autor:** Edward Siwy,

**Firma:** IPC Sp. z o.o., Gliwice

**KABEL**  
2026 ▲

**Tytuł:** *Optymalizacja wykorzystania usług  
elastyczności na potrzeby zarządzania pracą  
i planowania rozwoju sieci*



CENTRUM SZKOLENIOWO-KONFERENCYJNE  
"ENERGETYK" S.C.

20-867 Lublin, ul. Sudecka 73

✉ [biuro@energetyk.lublin.pl](mailto:biuro@energetyk.lublin.pl)

🌐 [www.energetyk.lublin.pl](http://www.energetyk.lublin.pl)

## 1. Wprowadzenie

Usługi elastyczności mogą być świadczone na rzecz operatorów sieci dzięki nowelizacji ustawy Prawo energetyczne z 2023 r. Usługi elastyczności są świadczone przede wszystkim na rzecz operatorów systemów dystrybucyjnych OSD. Operator systemu przesyłowego OSP pełni tu rolę koordynującą. Usługi te mogą być wykorzystywane także przez OSP, jako dodatkowe narzędzie poprawiające możliwości zarządzania pracą sieci.

Głównymi potrzebami związanymi z wykorzystaniem usług elastyczności, czyli regulacji mocy czynnej na rzecz systemu elektroenergetycznego, są: bilansowanie systemu oraz likwidacja ograniczeń (przede wszystkim prądowych i napięciowych) w sieci przesyłowej i rozdzielczej. Obiektami przyłączonymi do sieci mogącymi świadczyć takie usługi są zarówno wytwórcy, jak i odbiorcy zwykle redukujący swoją moc czynną na życzenie operatora sieci. Usługi te świadczyć mogą również agregatorzy. Typowym elementem regulacyjnym są w sieci także magazyny energii.

Określenie zapotrzebowania na usługi elastyczności oraz optymalizacja ich wykorzystania stanowi obecnie istotny problem związany z zarządzaniem pracą sieci dystrybucyjnej. W ramach projektu współfinansowanego przez NCBR opracowano metody optymalizacji wykorzystania usług elastyczności na bazie symulacji pracy sieci. Symulacja obejmuje analizę rozptyłów w sieci przy uwzględnieniu zmienności zapotrzebowania i generacji w zadanym horyzoncie czasowym. Opracowane algorytmy zaimplementowano jako prototyp w systemie obliczeniowym Smart-OeS. W ramach realizowanych zadań opracowano m.in. moduł MZPS, który pozwala na tworzenie grup zasobów wytwórczo-odbiorczych (GZWO) i dedykowanie typ grupom zadania optymalizacyjnego. Może nim być bilansowanie systemu (pełne zbilansowanie, utrzymanie stałej mocy, utrzymanie zadanego grafiku dobowego) lub eliminowanie ograniczeń sieciowych.

## 2. Algorytm likwidacji ograniczeń sieciowych

Analizowana jest sieć o  $N$  węzłach i  $G$  gałęziach. Po wykonaniu obliczeń rozptywu mocy w tej sieci, jako wynik, otrzymuje się wartości wszystkich napięć węzłowych  $U_i^R$  oraz mocy (prądów) gałęziowych  $S_{ij}^R$ . Wielkości te powinny zawierać się w określonych przedziałach dopuszczalnych:

$$U_i^{\min} \leq |U_i^R| \leq U_i^{\max}, \quad (1a)$$

$$|S_{ij}^R| \leq S_{ij}^{\text{dop}}. \quad (1b)$$

Gdy któryś z warunków (1a) lub (1b) nie jest spełniony należy dokonać zmiany punktów pracy sterowalnych elementów sieci. Do tych elementów należą źródła o regulowanym module napięcia (źródła wyposażone w automatykę ARN) oraz transformatory z regulacją

napięcia na przełącznikach zaczeów, wyposażone w automatykę ARN oraz zasoby wytwórczo-odbiorcze ZWO, w których wprowadzono możliwość regulacji mocy czynnej i ewentualnie mocy biernej. Elementy i ich parametry, które mogą być sterowane będą oznaczane górnym indeksem S. Ogólnie te elementy będą nazywane sterującymi. Możliwości regulacyjne tych elementów są ograniczone przez ich parametry techniczne i deklarowany zakres regulacji:

$$P_i^{S\min} \leq P_i^S \leq P_i^{S\max}, \quad (2)$$

Postawione zadanie należy do tzw. zadań optymalizacji rozptywu mocy w systemie i może być rozwiązane różnymi metodami – bardziej lub mniej dokładnymi, ale również czasochłonnymi. Ze względu na specyficzny charakter obliczeń w systemie proponuje się wykorzystanie prostej, stosunkowo pewnej i szybkiej metody programowania liniowego.

W zadaniu tym poszukuje się wektora  $\mathbf{x}$ , który minimalizuje liniową funkcję celu

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x},$$

gdzie  $\mathbf{w}$  jest wektorem wag (kosztów), a zarazem spełniający ograniczenia

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}.$$

Po zmianie parametrów sterujących zmianie ulegną napięcia w węzłach oraz przepływy gałęziowe, co można zapisać:

$$U_i^N = U_i^R + \Delta U_i(\Delta P^S, \Delta Q^S) \quad (3a)$$

$$S_{ij}^N = S_{ij}^R + \Delta S_{ij}(\Delta P^S, \Delta Q^S). \quad (3b)$$

Zmiany parametrów występujące w równaniach (3a) i (3b) można w niewielkim otoczeniu parametrów podstawowych (napięć węzłowych  $U_i^R$  oraz przepływów gałęziowych  $S_{ij}^R$ ) zlinearyzować.

$$\Delta U_i(\Delta P^S, \Delta Q^S) = C_{UP,i}^S \cdot \Delta P^S + C_{UQ,i}^S \cdot \Delta Q^S \quad (4a)$$

$$\Delta S_{ij}(\Delta P^S, \Delta Q^S) = C_{SP,i}^S \cdot \Delta P^S + C_{SQ,i}^S \cdot \Delta Q^S. \quad (4b)$$

gdzie :

$$C_{PU,i}^S = \frac{\partial U_i}{\partial P^S}, \quad C_{UQ,i}^S = \frac{\partial U_i}{\partial Q^S} \quad (5a)$$

$$C_{SP,i}^S = \frac{\partial S_{ij}}{\partial P^S}, \quad C_{SQ,i}^S = \frac{\partial S_{ij}}{\partial Q^S} \quad (5b)$$

są pochodnymi odpowiednio napięć w węzle 'i-tym' i mocy gałęziowej w i-tej gałęzi, po wszystkich zmiennych sterujących (mocach czynnych i biernych oraz zaczeach).

Należy teraz sprowadzić wszystkie ograniczenia w badanej sieci do postaci wymaganych przez algorytm programowania liniowego ( $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ ), gdzie  $\mathbf{x}$  jest wektorem

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^S \\ \Delta \mathbf{Q}^S \end{bmatrix} \quad (6)$$

szukanych przyrostów mocy czynnych i ewentualnie mocy biernych w elementach wyposażonych w takie możliwości.

Wagi w funkcji celu, dla poszczególnych grup zmiennych sterowanych, powinny być wagami kosztowymi, czyli określającymi koszt jednostkowy określonego działania: zmiany generacji mocy czynnej lub biernej.

Wyznaczenie współczynników czułości oddziaływań parametrów elementów sterowalnych na napięcia węzłowe i przepływy gałęziowe sprowadza się do wyznaczenia pochodnych funkcji tych parametrów względem poszczególnych sterowań (równania (5)). Jedną z metod możliwych do zastosowania, w celu ich wyznaczenia, jest metoda przyrostowa, polegająca na wykonaniu dodatkowego rozptywu mocy (dla każdej zmiennej sterującej) przyjmując tę zmienną powiększoną o jednostkę. W tym przypadku poszczególne pochodne są w przybliżeniu równe różnicy danej (badanej) wielkości (zmiennej sterującej) z rozptywu przyrostowego i normalnego (podstawowego). Przykładowo wykonując przyrostowy rozptyw mocy dla zwiększonej mocy czynnej w węźle nr 1 możemy wyznaczyć pochodne napięć węzłowych względem tego przyrostu oraz przepływów gałęziowych we wszystkich gałęziach uwzględniając przepływy na obu końcach tych gałęzi. Jeżeli wyniki rozptywu przyrostowego oznaczyć z górnym indeksem (+) to współczynniki czułości dane wzorami (5a) i (5b) dla mocy czynnej można wyznaczyć:

$$\mathbf{C}_{PU,i}^S = \frac{U_i^+ - U_i^R}{\Delta P_1}, \quad (7a)$$

$$\mathbf{C}_{SP,i,l}^S = \frac{S_{ij}^+ - S_{ij}^R}{\Delta P_1}, \quad (7b)$$

Algorytm można również wykorzystać w zadaniu bilansowania przyjmując dla wybranych gałęzi (bilansujących) ograniczenie równościowe.

### 3. Wykorzystywanie algorytmów w module MZPS

Do głównych zadań modułu MZPS należy:

- przygotowanie scenariusza analiz dla potrzeb realizacji celów MZPS, w tym wybór środków regulacji w systemie rozdzielczym oraz wybór zasobów wytwórczo-odbiorczych ZWO regulowanych na potrzeby zarządzania pracą systemu elektroenergetycznego;
- identyfikacja przekroczeń sieciowych lub identyfikacja niedotrzymania wymaganego poziomu mocy dla obiektów, węzła lub gałęzi – w zależności od wybranej ścieżki;
- wyznaczenie podatności systemu rozdzielczego na użycie zadeklarowanych środków regulacyjnych;
- wypracowanie podpowiedzi działań ruchowych dla wybranych ZWO regulowalnych – w zależności od wybranej ścieżki.

Zadania te są realizowane w ramach algorytmu przedstawionego na rys.1. Poniżej opisano kluczowe bloki algorytmu MZPS. Główne bloki algorytmu MZPS można podzielić na dwa strumienie, które definiuje się poprzez wybranie jednego z dwóch celów regulacji.

#### Akwizycja technicznych i ekonomicznych danych wejściowych o obiektach sieci rozdzielczej SR i ZWO

W tym bloku następuje deklaracja parametrów przez wykonawcę symulacji. Przez techniczne dane wejściowe o SR i ZWO rozumie się informacje m.in. o parametrach elektrycznych obiektów SR i ZWO, topologii SR, warunkach pracy ZWO (m.in. prognoza pogody), zakresach regulacyjnych środków regulacji (w tym ich intencjonalnych ograniczeniach). Dane ekonomiczne to m.in. koszty jednostkowe regulacji, ceny energii.

#### Wybór metody prowadzenia analiz

W ramach tego kroku, w zależności od potrzeb symulacyjnych deklaruje się metody realizacji symulacji. Do wyboru jest jedna spośród trzech następujących metod: metoda deterministyczna, metoda stochastyczna, metoda scenariuszowa. W zależności od wybranej metody jako dane wejściowe do analiz będą przyjmowane:

- dla metody deterministycznej –zadeklarowane przeciętne profile godzinowe ZWO; wynikiem będzie wektor wartości mocy pobieranej z SR przez ZWO lub wprowadzanej do tego SR przez ZWO dla każdego  $k$ -tego przedziału czasowego:  $P_{ZWO}(k)$ ,
- dla metody stochastycznej – M zestawów wylosowanych profili godzinowych ZWO; wynikiem będzie wektor wartości mocy pobieranej z SR przez ZWO lub wprowadzanej do tego SR przez ZWO dla każdego  $k$ -tego przedziału czasowego:  $P_{ZWO}(k)$ ,

- dla metody scenariuszowej – M zestawów profili godzinowych ZWO dla wskazanych scenariuszy; wynikiem będzie wektor wartości mocy pobieranej z SR przez ZWO lub wprowadzanej do tego SR przez ZWO dla każdego  $k$ -tego przedziału czasowego:  $P_{ZWO}(k)$ .

#### Wyznaczenie podatności SR na użycie zadeklarowanych regulowalnych ZWO

W tym bloku następuje wyznaczenie wskaźników podatności parametrów węzłowych i gałęziowych SR na użycie zadeklarowanych regulowanych ZWO. Wynikiem tego bloku jest macierz współczynników czułości oddziaływań zmiany parametrów każdego z zadeklarowanych ZWO na napięcia węzłowe i prądy gałęziowe w SR.

#### Wyznaczenie napięć węzłowych i prądów gałęziowych SR;

Symulacja ma na celu identyfikację przekroczeń sieciowych SR oraz bilansowanie systemu (w zależności od celu regulacji)

#### Wyznaczenie zmian parametrów środków regulacji wymaganych do minimalizacji przekroczeń sieciowych w SR;

Działania w ramach tego bloku powinny prowadzić do otrzymania trzech zasadniczych wyników działania. Wynik 1 to wektor zmiany pozycji przełącznika zaczepek w zadeklarowanych transformatorach w SR  $\Delta Tr_r(k)$  wymaganych do minimalizacji wyznaczonych przekroczeń napięciowych w węzłach SR  $\Delta U(k)$ , z uwzględnieniem współczynników czułości określających podatność SR na użycie danego rodzaju środka regulacji  $C_{UU}$ , zgodnie z zależnością dla każdego  $k$ -tego przedziału czasowego:  $\Delta Tr_{ri}(k) = C_{UUri} \cdot \Delta U_i(k)$  (dla  $i$ -tego węzła SR i  $r$ -tego regulowanego transformatora). Wynik 2 dotyczy wektora zmiany mocy czynnej w zadeklarowanych regulowalnych ZWO  $\Delta Q_l$  wymaganych do minimalizacji wyznaczonych przekroczeń napięciowych w węzłach SR  $\Delta U(k)$ , z uwzględnieniem współczynników czułości określających podatność SR na użycie danego rodzaju środka regulacji  $C_{UQ}$ , zgodnie z zależnością dla każdego  $k$ -tego przedziału czasowego analiz:  $\Delta P_{li}(k) = C_{UQli} \cdot \Delta U_i(k)$  (dla  $i$ -tego węzła SR i  $l$ -tego regulowanego ZWO). Natomiast Wynik 3 obejmuje wektor zmiany mocy czynnej w zadeklarowanych regulowalnych ZWO  $\Delta P_l$  wymaganych do minimalizacji wyznaczonych przekroczeń prądowych w gałęziach SR  $\Delta I(k)$ , z uwzględnieniem współczynników czułości określających podatność SR na użycie danego rodzaju środka regulacji  $C_{SP}$ , zgodnie z zależnością dla każdego  $k$ -tego przedziału czasowego:  $\Delta P_{lij}(k) = C_{SPlij} \cdot \Delta I_i(k)$  (dla gałęzi SR między  $i$  tym i  $j$ -tym węzłami SR i  $l$ -tego regulowanego ZWO).

#### Zdefiniowanie zadania bilansowania - zadanie wymaganego poziomu mocy dla gałęzi SR;

Dla przedmiotowego celu regulacji MZPS jako gałąź SR rozumie się rzeczywistą gałąź w SR lub wirtualną gałąź, stanowiącą agregację kilku rzeczywistych gałęzi w SR, dla których

definiuje się profil godzinowy oczekiwanej mocy sumarycznej. Wynikiem tego bloku jest oczekiwana wartość mocy czynnej w gałęzi SR:  $P_{ocz}(k)$ .

Identyfikacja niedotrzymania zadanego poziomu mocy

W ramach tego bloku następuje wyznaczenie wektora różnicy oczekiwanej  $P_{ocz}(k)$  i wyznaczonej z rozplywu  $P_{symulacja}(k)$  wartości mocy czynnej w gałęzi SR dla każdego  $k$ -tego przedziału czasowego:  $\Delta P(k) = P_{ocz}(k) - P_{symulacja}(k)$ .

KABEL  
2026 ■



### Wyznaczenie zmian parametrów środków regulacji wymaganych do utrzymania zadanego poziomu mocy

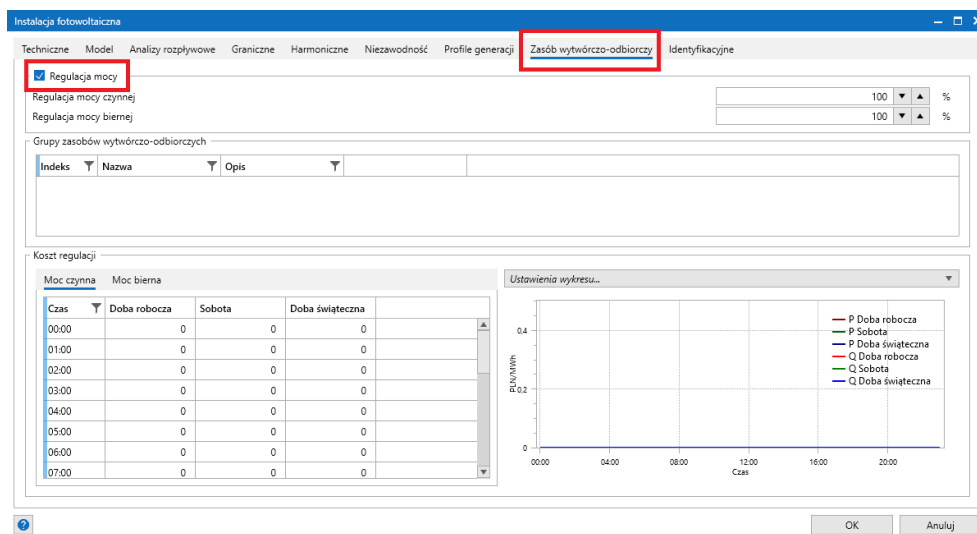
W ramach tego bloku następuje wypracowanie wektora zmiany mocy czynnej w zadeklarowanych regulowalnych ZWO  $\Delta P_l$  wymaganych do minimalizacji wyznaczonego niedotrzymania zadanego poziomu mocy czynnej w gałęzi SR  $\Delta P(k)$ , z uwzględnieniem współczynników czułości określających podatność SR na użycie poszczególnych  $l$ -tych zadeklarowanych regulowalnych ZWO  $C_{SP_l}$ , zgodnie z zależnością dla każdego  $k$ -tego przedziału czasowego:  $\Delta P_{lij}(k) = C_{SP_{lij}} \cdot \Delta P_l(k)$  (dla gałęzi SR między  $i$ -tym i  $j$ -tym węzłami SR i  $l$ -tego regulowanego ZWO).

### Wyznaczenie techniczno-ekonomicznego rankingu użycia środków regulacji

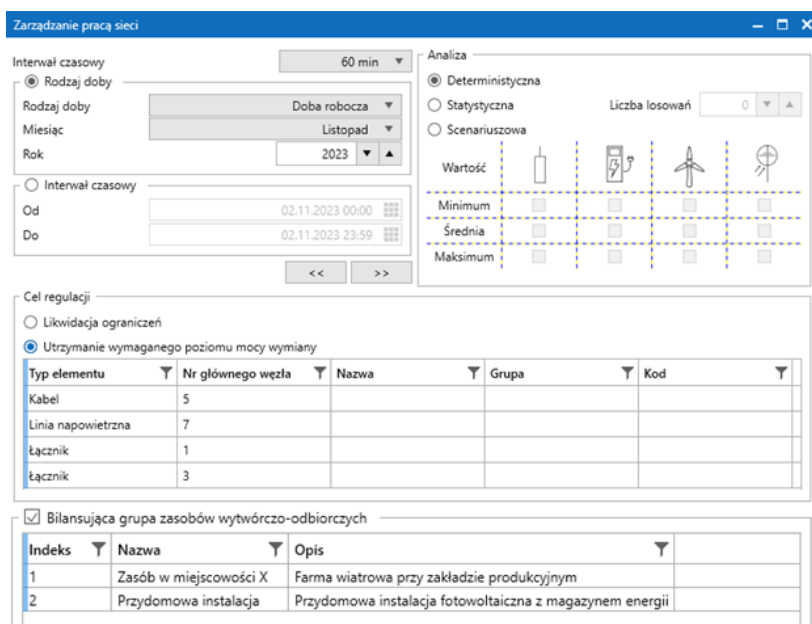
Wynik obejmuje optymalizację rozkładu zadeklarowanych środków regulacyjnych metodą programowania liniowego, dla każdego  $k$ -tego przedziału czasowego oraz optymalizację działań ruchowych polegającą na wyznaczeniu statystycznego rankingu użycia środków regulacji (działanie realizowane jednokrotnie dla rozpatrywanego przedziału czasowego symulacji). Wynik tego bloku powinien posłużyć do dokonania globalnej oceny możliwości realizacji zadania. Blok ten jest wspólny dla lewej i prawej ścieżki algorytmu MZPS. W ramach tego bloku następuje wypracowanie globalnych podpowiedzi działań ruchowych.

## 4. Implementacja w systemie obliczeniowym OeS

Prototyp modułu MZPS w systemie OeS wymagał implementacji szeregu elementów interfejsu oraz modułów obliczeniowych. Rys. 2 przedstawia przykładowe okno do aktywacji ZWO, definiowania ich zasobów regulacyjnych i wprowadzania ich parametrów (m.in. kosztów w dziedzinie czasu). Na rys. 3 przedstawiono okno do konfiguracji obliczeń. Ustala się w nim m.in. horyzont czasowy, metodę obliczeń, cel regulacji.

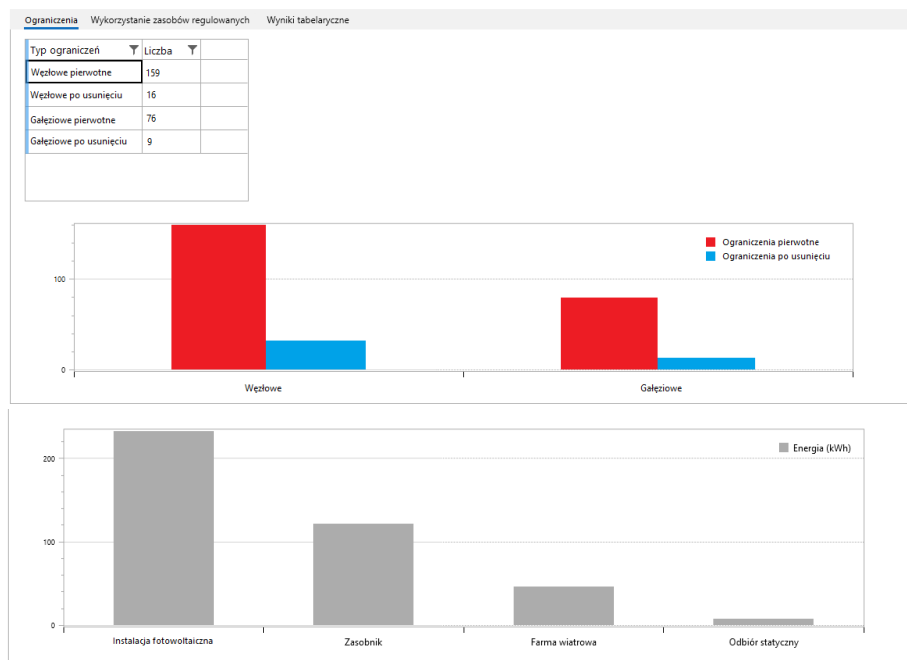


Rys. 2. Aktywacja zasobów wytwórczo-odbiorczych w instalacji fotowoltaicznej



Rys.3. Okno konfiguracji obliczeń w module MZPS

Przykładowe okno z wynikami obliczeń przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wyniki algorytmu likwidacji ograniczeń i wykorzystanie zasobów regulowanych

W referacie wykorzystano materiały projektu:



**Smart-OeS - System wspomagający zarządzanie pracą i planowanie rozwoju sieci elektroenergetycznych nasyconych zasobami wytwórczo-odbiorczymi**

projekt współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój. Nr umowy POIR.01.01.01-00-0972/18-00