



Europejski  
Instytut Miedzi  
Copper Alliance



---

# **Kable energetyczne**

## Stan i potrzeby rozwojowe sieci elektroenergetycznych w procesie transformacji niskoemisyjnej w Polsce.

Wiesław Nowak,  
Waldemar Szyra,  
Rafał Tarko  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie,  
Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

Nr ref EIM: EIM6106

# 1. Problemy procesu transformacji niskoemisyjnej

Transformacja elektroenergetyki w kierunku produkcji i przesyłania energii elektrycznej przy możliwie niskiej emisji gazów cieplarnianych, stanowi jedno z najważniejszych wyzwań stojących przed państwami członkowskimi Unii Europejskiej. Należy oczekiwać, że mimo spodziewanych problemów i trudności, jakie niesie ze sobą przestawianie gospodarki energetycznej na tory niskoemisyjne, korzyści z tego wynikające stanowiąc będą silny impuls rozwojowy nie tylko dla indywidualnych przedsiębiorców, ale również dla całej krajowej gospodarki. Aby tak się stało, strategia transformacji powinna uwzględniać zarówno zmieniający się kontekst globalny, jak i powinna być dopasowana do realiów społeczno-gospodarczych naszego państwa.

Spalanie paliw kopalnych przez energetykę zawodową jest największym źródłem gazów cieplarnianych w Polsce (ponad 40% emisji GHG – ang. greenhouse gas w 2011 roku). Polska energetyka cechuje się wysoką emisyjnością w przeliczeniu na jednostkę wyprodukowanej energii. W 2011 według szacunków Międzynarodowej Agencji Energii była ona ponad dwukrotnie wyższa od średniej unijnej (780 gCO<sub>2</sub>/kWh w Polsce przy 352 gCO<sub>2</sub>/kWh w państwach UE- 28) [1].

Wysoka emisyjność polskiej energetyki wynika nie tylko z oparcia sektora wytwarzania energii elektrycznej na dostępnych paliwach kopalnych (węgiel kamienny i brunatny), ale również z niskiej sprawności przestarzałych bloków energetycznych. Blisko 25% mocy wytwórczej w Polsce pochodzi z elektrowni mających ponad 40 lat, zaś aż 60% bloków jest starsza niż 30 lat. Oznacza to, że nawet przy zastosowaniu wszystkich możliwości modernizacyjnych i wykorzystywaniu działających dziś elektrowni przez maksymalny technicznie dopuszczalny okres (szacowany na 50 lat), do roku 2030 wymianie musi ulec około połowy obecnej infrastruktury produkcyjnej w sektorze, a do roku 2040 nawet 80%. W ciągu najbliższych dwóch-trzech dekad niezbędna więc będzie niemal pełna wymiana infrastruktury produkcyjnej w polskiej energetyce zawodowej. Należy zauważyć, że technologia zastosowana w elektrowniach projektowanych w latach sześćdziesiątych, siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku nie pozwalała na uzyskanie wysokiej sprawności, przez co obecnie średnia osiągalna sprawność bloków energetycznych w elektrowniach węglowych wynosi około 35%. Poprawa tego wskaźnika wymagać będzie znacznej modernizacji bloków energetycznych i zastępowania istniejącej infrastruktury nowymi rozwiązaniami o lepszych parametrach technicznych. Zakłada się, że działania podjęte w tym kierunku mogą przynieść podniesienie średniej sprawności bloków energetycznych do poziomu około 45%.

Należy również zauważyć, że dalsze dążenia do gospodarki niskoemisyjnej wymagają zmiany struktury wytwarzania i zwiększenia mocy wytwórczej w elektrowniach niskoemisyjnych, do których należą między innymi elektrownie jądrowe, wiatrowe czy gazowe. Budowa elektrowni jądrowych, pomimo dużych nakładów inwestycyjnych może w dłuższej perspektywie czasu przynosić większe zyski, między innymi z uwagi na znaczne koszty zakupu uprawnień do emisji.

W perspektywie kilkunastu, kilkudziesięciu lat wzrośnie niewątpliwie rola elektrowni wytwarzających energię elektryczną ze źródeł odnawialnych, takich jak elektrownie wiatrowe i fotowoltaiczne, zwłaszcza pracujących w modelu rozproszonym. Ich rola może jednak być ograniczona z uwagi na małą dyspozycyjność obu tych źródeł odnawialnych.

Powyższe problemy transformacji sektora wytwarzania energii elektrycznej, wyznaczać będą zasadnicze kierunki rozwoju sieci elektroenergetycznych. Wynika to przede wszystkim z tego, że infrastruktura sieciowa pełni rolę ogniwa pośredniczącego pomiędzy wytwórcami a odbiorcami energii elektrycznej. Należy oczekiwać, że dotychczasowy model rozwoju, wynikający z wiodącej roli jaką odgrywa wielkoskalowa „elektroenergetyka węglowa”, będzie podlegał zmianom uwarunkowanym procesem transformacji niskoemisyjnej, szczególnie w kierunku energetyki rozproszonej, powstającej w oparciu o odnawialne źródła energii. Zachodzące zmiany definiować więc będą potrzeby rozwojowe sieci elektroenergetycznych, szczególnie w kierunku efektywnej integracji z systemem elektroenergetycznym źródeł rozproszonych.

Podstawowe potrzeby i kierunki rozwoju sieci elektroenergetycznych muszą być inaczej definiowane w obszarze przesyłania, niż w obszarze dystrybucji energii elektrycznej. W obszarze przesyłania decydujące znaczenie mają następujące przesłanki:

- ograniczanie roli i mocy elektrowni węglowych,
- modernizacja i podnoszenie sprawności elektrowni węglowych,
- ewentualny transfer mocy i zdolności wytwórczych z elektrowni węglowych do elektrowni jądrowych,
- konieczność zapewniania w elektrowniach wielkoskalowych rezerwy dla źródeł rozproszonych,

- rozwój sieciowych połączeń międzysystemowych dla zapewnienia większych możliwości wzajemnego rezerwowania się europejskich systemów elektroenergetycznych ,
- rozwój wielkoskalowych (systemowych) zasobników energii elektrycznej,
- rozwój efektywnych technologii inteligentnych przesyłowych sieci elektroenergetycznych *Smart Grids*.

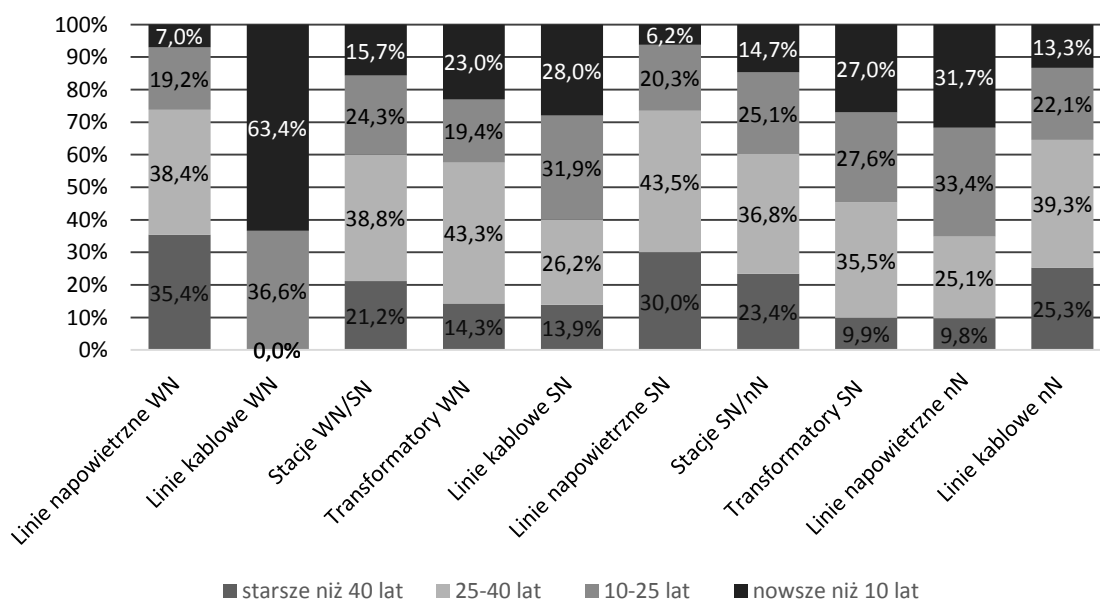
Z kolei w obszarze dystrybucji energii elektrycznej istotne jest rozważenie potrzeb rozwojowych sieci rozdzielczych, przede wszystkim w aspekcie rozwoju energetyki rozproszonej, bowiem źródła te są i będą przyłączane do sieci elektroenergetycznych średnich i niskich napięć. Do podstawowych przesłanek można zaliczyć:

- możliwości techniczne przyłączania źródeł rozproszonych, szczególnie mikroźródeł przyłączanych do sieci niskiego napięcia,
- rozwój zasobników lokalnych, mikrozasobników oraz zasobników mobilnych energii elektrycznej,
- opracowanie i rozwój efektywnych technologii inteligentnych dystrybucyjnych sieci elektroenergetycznych *Smart Grids*,
- tworzenie obszarów lokalnego bilansowania energii elektrycznej,
- wzrost znaczenia prosumentów w produkcji i zużyciu energii elektrycznej,
- uwarunkowania prawne procesu przyłączania oraz sterowania pracą źródeł rozproszonych,
- uwarunkowania ekonomiczne – zasady wsparcia inwestycji, zasady rozliczeń.

Nakreślone powyżej ogólne kierunki i potrzeby rozwojowe sieci elektroenergetycznych uwarunkowane są procesami transformacji zachodzącymi w sektorze wytwarzania energii. Należy również wskazać na inny, bardziej aktywny, wkład sieci elektroenergetycznych w proces transformacji niskoemisyjnej. Są to wszelkiego rodzaju przedsięwzięcia, przyczyniające się do obniżenia emisji substancji szkodliwych. Do takich przedsięwzięć zaliczyć można między innymi zastosowanie rozwiązań, prowadzących do ograniczania strat sieciowych.

## 2. Stan sieci elektroenergetycznych należących do operatorów sieci przesyłowych i dystrybucyjnych

Stan techniczny infrastruktury energetycznej oceniany jest pod względem zaawansowania technicznego i technologicznego oraz pod względem zużycia wynikającego z wieloletniej eksploatacji. Inwestycje prowadzone w sieciach elektroenergetycznych wynikają z konieczności zastępowania starych i uszkodzonych urządzeń oraz przede wszystkim wpisują się w wieloletni plan modernizacji sieci elektroenergetycznych, mający na celu jej dostosowanie do potrzeb zwiększonego zużycia energii elektrycznej oraz zmiany modelu sterowania siecią elektroenergetyczną. Strukturę wiekową poszczególnych elementów elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura wiekowa podstawowych elementów sieci dystrybucyjnych (opracowano na podstawie [2]).

Od sieci elektroenergetycznych wymaga się zapewnienie bezpiecznej, ciągłej i efektywnej dostawy energii elektrycznej od dostawców do odbiorców. Spełnienie tych wymagań narzuca następujące kierunki rozwoju tych sieci:

- rozwój i rozbudowa sieci przesyłowych w tym połączeń transgranicznych dla podniesienia niezawodności oraz zwiększenia zdolności przesyłowych,
- rozwój istniejących sieci SN i nN w celu poprawy możliwości ich monitorowania i sterowania (wprowadzanie rozwiązań typu SMART),
- dostosowanie sieci SN i nN do możliwości bilansowania lokalnego,
- wprowadzanie automatyki rozproszonej w głębi sieci SN,
- wprowadzenie na szeroką skalę inteligentnych systemów pomiarowych (AMI),
- podniesienie jakości usług dystrybucyjnych (dla dostawców i odbiorców),
- wdrażanie rozwiązań mogących przyczynić się do obniżenia sieciowych strat energii,
- dostosowanie sieci dla umożliwienia realizacji wymagań planowanego rozwoju elektromobilności.

### **3. Stan przygotowania polskich sieci elektroenergetycznych do aplikacji rozwiązań typu SMART**

Pojęcie „smart grid” jest bardzo pojemne, a w związku z tym różne projekty realizowane w zakresie szeroko pojętego zaopatrzenia w energię elektryczną zawierają w tytule to pojęcie. Zaliczane są tu zarówno projekty typu Home Area Network (HAN), mikro-sieci przemysłowe, inteligentne opomiarowanie (smart metering), jak i zaawansowane systemy sterowania sieciami elektroenergetycznymi. Niezależnie od obszaru i zasięgu oddziaływania, cechą wspólną tych systemów jest wykorzystanie zaawansowanych technologii informatyczno-telekomunikacyjnych, służących do przesyłania informacji o charakterze technicznym (wyniki pomiarów różnych wielkości elektrycznych, sygnały sterujące, itp.) i/lub informacji o charakterze handlowym (zużycie energii, informacje o taryfie itp.).

Celem wprowadzania rozwiązań typu „smart” w elektroenergetyce jest m.in.:

- poprawa bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego,
- poprawa ciągłości dostarczania i jakości energii elektrycznej,
- integracja rozproszonych źródeł energii z systemem elektroenergetycznym (w tym źródeł odnawialnych i prosumenckich),
- poprawa efektywności zaopatrzenia w energię elektryczną,
- wdrażanie na szeroką skalę rozwiązań rynkowych, w tym również udziału odbiorców i prosumentów w programach sterowania popytem.

Istotne znaczenie dla powodzenia działań w zakresie czynnego uczestnictwa odbiorców, prosumentów i właścicieli źródeł rozproszonych we wprowadzaniu rozwiązań typu smart, oprócz rozwiązań problemów technicznych, będzie miało przyjęcie odpowiednich zmian prawnych oraz systemu regulacji.

Jednym z podstawowych czynników determinujących dotychczasowy rozwój sieci przesyłowych jest geografia wytwarzania i konsumpcji energii elektrycznej. Eksploatowane obecnie elektrownie węglowe, w większości przypadków budowane były możliwie najbliżej miejsca wydobycia paliwa. Pewna swoboda, co do miejsca lokalizacji elektrowni jądrowych czy elektrowni gazowych, może zakłócić dotychczasowy proces rozwoju sieci przesyłowej, zważywszy na ich rolę w dostawie energii elektrycznej, czyli transportu dużych ilości energii na znaczne odległości. Kolejnym istotnym elementem może być rozwój dużych OZE przyłączanych bezpośrednio do sieci przesyłowych. Pojawiają się tu nowe wyzwania dla pracy systemu elektroenergetycznego, związane z przyłączeniem i eksploatacją niestabilnych źródeł, których zdolności wytwórcze uwarunkowane są specyficznymi procesami przemian energetycznych, głównie energii wiatru czy promieniowania słonecznego. Opracowanie efektywnych technologii inteligentnych przesyłowych sieci elektroenergetycznych *Smart Grids*, ma tu kluczowe znaczenie, szczególnie z zastosowaniem systemowych zasobników energii elektrycznej.

Wymagania i kierunki rozwoju sieci elektroenergetycznych konieczne do wprowadzenia rozwiązań typu *Smart Grids*, są definiowane inaczej w obszarze przesyłania, niż w obszarze dystrybucji energii elektrycznej. W obszarze przesyłania decydujące znaczenie będą miały procesy transformacji niskoemisyjnej w sektorze wytwarzania energii elektrycznej, czego konsekwencją będzie przede wszystkim rozłożone w czasie,

sukcesywne ograniczanie roli oraz mocy elektrowni węglowych w krajowym systemie elektroenergetycznym i odtwarzanie potencjału wytwórczego w innych źródłach energii.

Rozpoczęty proces transformacji niskoemisyjnej wyznacza również nowe zadania dla elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych. Pomimo, że trudno jest obecnie jednoznacznie określić kierunki tego rozwoju, to można założyć, że podstawowym czynnikiem będzie tu zapewne znaczny transfer mocy i zdolności wytwórczych w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym z elektrowni węglowych do rozproszonych systemów energii elektrycznej, które powstawać będą w oparciu o odnawialne źródła i mikroźródła energii elektrycznej. Podstawowymi wymaganiami i kierunkami rozwoju tych sieci elektroenergetycznych, koniecznymi do wprowadzenia rozwiązań typu *Smart Grids* będą:

- dopracowanie rozwiązań technicznych w zakresie przyłączania źródeł rozproszonych, szczególnie mikroźródeł do sieci niskich napięć,
- opracowanie rozwiązań prawnych i ekonomicznych procesu przyłączenia oraz sterowania pracą źródeł rozproszonych,
- wdrożenie technologii lokalnych zasobników i mikrozasobników energii elektrycznej,
- gotowość Operatorów Systemów Dystrybucyjnych do realizacji szeregu zadań i pełnienia funkcji, takich jak:
  - rozwój sieci dystrybucyjnych;
  - przyłączanie do sieci średniego i niskiego napięcia źródeł rozproszonych;
  - rozwój telekomunikacji w sieciach dystrybucyjnych, przede wszystkim średnich i niskich napięć;
  - rozwój inteligentnego opomiarowania sieci dystrybucyjnych, w tym wdrażania rozwiązań AMI;
  - rozwój automatyzacji sieci dystrybucyjnych;
  - rozwój odpowiednich systemów informatycznych;
  - prowadzenie bilansowania lokalnego (tzw. *local dispatching*) z dużym udziałem klastrów z ich własnym bilansowaniem energii elektrycznej (tzw. *selfdispatchingiem*);
  - pełnienie funkcji BRP (Balance Responsible Party) dla rozwijającej się grupy prosumentów;
  - współpraca z agregatorami typu wirtualne elektrownie;
  - realizacja zadań w zakresie elektromobilności.

Należy ponadto wskazać, że spodziewany w przyszłości znaczny transfer zdolności wytwórczych do systemów rozproszonych, przyłączanych do sieci dystrybucyjnych średnich i niskich napięć, przy realizacji w praktyce wyżej wymienionych postulatów, może przyczynić się do ograniczania roli sieci przesyłowych.

## 4. Możliwości wprowadzania rozwiązań opartych na miedzi

Ze względu na wysoką przewodność elektryczną, miedź jest wykorzystywana do budowy kabli i przewodów elektrycznych, uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych. Ze względu na dużą przewodność cieplną i łatwość obróbki mechanicznej, miedź znajduje szerokie zastosowanie do budowy wymienników ciepła, pomp ciepła i kolektorów słonecznych. Miedź, podobnie jak aluminium, jest bez utraty jakości, prawie w 100% poddawana recyklingowi.

Ze względu na wysoką cenę, w sieciach średnich i niskich napięć powszechnie wykorzystuje się kable i przewody wykonane z aluminium. Jedynie w sieciach o napięciu 110 kV i wyższym stosuje się kable miedziane, ale linie kablowe o takich napięciach mają znikomy udział w całkowitej długości tych linii.

W sieciach napowietrznych powszechnie wykorzystuje się przewody aluminiowe (AAC – All Aluminium Conductor) – do budowy linii niskiego napięcia, przewody aluminiowe z rdzeniem stalowym (ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced), a obecnie również przewody stopowe (AAAC – All Aluminium Alloy Conductors) i stopowo-aluminiowe (ACAR – Aluminium Conductor Alloy Reinforced) – do budowy linii średnich, wysokich i najwyższych napięć. Przewody miedziane nie znalazły szerszego zastosowania w budowie napowietrznych linii elektroenergetycznych – głównie ze względu na większy ciężar oraz cenę przewodów. Parametry wybranych przewodów stalowo-aluminiowych i miedzianych zestawiono w tabeli 1.

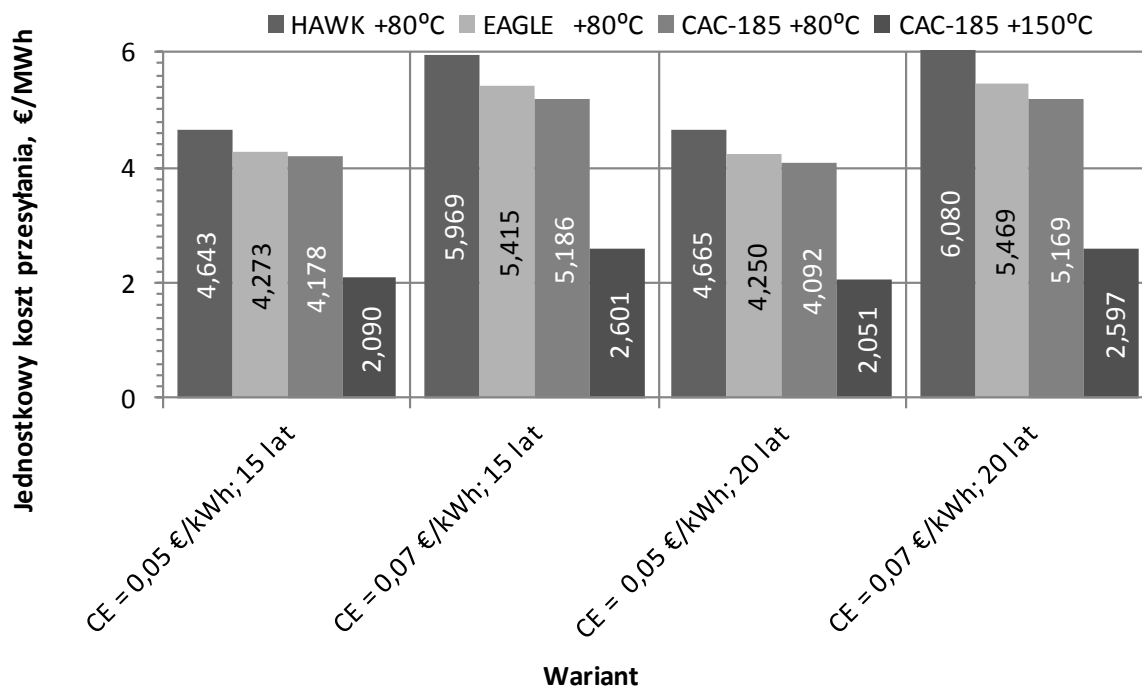
Tabela 1. Wybrane parametry przewodów stalowo-aluminiowych i przewodów miedzianych [3]

Parametr [jednostka]	Przewód			
	ACSR Hawk	ACSR Eagle	CAC-185	CAC-240
Przekrój poprzeczny [mm <sup>2</sup> ]	281,1	347,7	185	240
Średnica zewnętrzna [mm]	21,8	24,21	17,6	20,6
Maksymalna temperatura pracy [°C]	80	80	150	150
Obciążalność prądowa w 80°C [A]	630	730	1 110 <sup>1)</sup>	1 335
Ciężar [kg/km]	982,3	1301,8	1652	2 136
Rezystancja [Ω/km]	0,1195	0,103	0,0981	0,0756
Wytrzymałość na rozciąganie [kN]	85	123,6	92,5	120
Moduł sprężystości [kN/mm <sup>2</sup> ]	77	81	50	50
Rozszerzalność cieplna [10 <sup>-6</sup> /°C]	18,9	17,8	16,8	16,8
Cena [€/km]	4 000	5 000	12 843	16 661

<sup>1)</sup> – obciążalność w temperaturze +150°C

W raporcie „New generation copper conductors for overhead lines. Feasibility Study” [3] przedstawiono wyniki obliczeń kosztów budowy i eksploatacji (LCC – Life-cycle cost) linii elektroenergetycznej na napięcie 220 kV i długości 70 km z przewodami stalowo-aluminiowymi i z przewodami miedzianymi. Obliczenia wykonano dla dwóch przewodów stalowo-aluminiowych (HOWK i EAGLE) jako referencyjnych oraz przewodu wykonanego ze stopu miedzi (CAC-HLS – Copper Alloy Conductor Hydrofobic Low Sag).

Z rysunku 2 wynika, że w każdym z analizowanych wariantów jednostkowe koszty przesyłania energii linią z przewodami miedzianymi (w przypadku linii zaprojektowanej na temperaturę +80°C) są niższe od około 10% do blisko 16% niż w przypadku linii z przewodami stalowo-aluminiowymi HAWK. W przypadku wykorzystania pełnej obciążalności linii z przewodami miedzianymi jednostkowe koszty przesyłania energii są prawie dwukrotnie niższe niż przy obciążalności wyznaczonej dla temperatury +80°C.



Rys. 2. Jednostkowe koszty przesyłania energii porównywanymi liniami (opracowano na podstawie [3])

Przewody CAC, ze względu na wyższą dopuszczalną temperaturę pracy mogą być również wykorzystane jako zamiennik, w sytuacjach gdy zachodzi konieczność zwiększenia obciążalności linii z przewodami stalowo-aluminiowymi, przy wykorzystaniu istniejących konstrukcji słupów [4].

Dalszych możliwości zwiększenia wykorzystania miedzi w elektroenergetyce należy upatrywać przy produkcji transformatorów dystrybucyjnych SN/nN oraz maszyn elektrycznych.

W Polsce co roku buduje się ponad 2 tysiące nowych stacji SN/nN, a oprócz tego podobna ilość transformatorów jest wymieniana z różnych względów na nowe o większej sprawności. Konieczność stosowania transformatorów o większej sprawności wynika m.in. z Rozporządzenia Komisji Unii Europejskiej nr 548/2014 z dnia 21 maja 2014 roku, które wprowadza ograniczenie maksymalnego poziomu strat jałowych  $P_0$  i obciążeniowych  $P_k$  w nowo instalowanych transformatorach energetycznych. Z rozporządzenia tego wynika, że od 1 lipca 2015 roku możliwe jest instalowanie transformatorów klasy energetycznej  $A_0C_k$ , a od 1 lipca 2021 roku transformatorów o stratach stanu jałowego zmniejszonych o 10% w stosunku do klasy  $A_0$  i o stratach obciążeniowych klasy  $A_k$ . Ponieważ straty obciążeniowe zależą od rezystancji uzwojeń, a tym samym od ilości miedzi, to ograniczenie tych strat będzie się wiązało ze wzrostem wykorzystania miedzi.

W Europie coraz częściej wykorzystuje się miedź do budowy kłatek wirników maszyn elektrycznych, dzięki czemu maszyny elektryczne mają większą sprawność i mniejsze gabaryty w porównaniu z maszynami wykorzystującymi aluminium do budowy kłatek wirników. Zastosowanie miedzi do budowy kłatek wirników maszyn elektrycznych stało się możliwe dzięki opanowaniu technologii budowy bardziej trwałych form do ich odlewania.

## 5. Podsumowanie

Proces transformacji niskoemisyjnej na świecie i w Polsce staje się faktem. Jedną z dziedzin, która może przyczynić się do istotnego obniżenia emisji jest elektroenergetyka, a w szczególności sektor wytwarzania energii elektrycznej. Realizacja tego procesu będzie wymagała zmian w zakresie wytwarzania (odchodzenia od wielkoskalowych źródeł energii opartych o spalanie węgla) na rzecz wielkoskalowych niskoemisyjnych źródeł (elektronie jądrowe i gazowe) oraz źródeł rozproszonych, wykorzystujących głównie energię odnawialną. Nie pozostanie to bez wpływu na kierunki rozwoju sieci elektroenergetycznych. Realizacja tych celów będzie wymagała wprowadzenia nowej jakości w sterowaniu i zarządzaniu systemem przesyłania i dystrybucji energii elektrycznej.

O ile stan sieci przesyłowej i planowane przez Operatora tej sieci przedsięwzięcia inwestycyjne, uwzględniają potrzeby wynikające z transformacji polskiej elektroenergetyki w kierunku niskoemisyjnym, to sieć dystrybucyjna, w szczególności średniego i niskiego napięcia wymaga gruntownych przeobrażeń w zakresie technicznym oraz uwarunkowań prawnych.

Transformacja w kierunku niskoemisyjnej elektroenergetyki będzie wymagać inwestycji w zakresie elementów sieci elektroenergetycznych (linie i stacje) oraz implementacji nowoczesnych technologii w obszarze sterowania i zarządzania siecią – wprowadzenie rozwiązań typu Smart. Wiele takich zadań i inwestycji jest realizowanych przez operatorów systemów elektroenergetycznych w Polsce. Jest to jednocześnie jeden z dwóch głównych kierunków rozwoju krajowej elektroenergetyki w procesie transformacji niskoemisyjnej. Drugim istotnym kierunkiem są działania zmierzające do poprawy ciągłości zasilania odbiorców i zwiększenia efektywności energetycznej, między innymi poprzez zmniejszenie strat energii. Zmniejszenie strat można osiągnąć przez zwiększenie wykorzystania miedzi do budowy elementów sieci elektroenergetycznej, a także przez wykorzystanie optymalizacji w procesie sterowania on-line pracą sieci dystrybucyjnych oraz sterowanie popytem.

## Literatura

- [1] Ocena stanu technicznego infrastruktury gospodarki (Materiał przygotowany na zlecenie Ministerstwa Gospodarki). PwC Polska Sp. z o.o., Warszawa 30 kwietnia 2014 r.
- [2] Tomczykowski J.: Sieci energetyczne pięciu największych operatorów., Energia Elektryczna - nr 5/2015
- [3] Clercx M.J.: New generation copper conductors for overhead lines. Feasibility Study, 74101243-ETD/POL 13-0934 V2.0, DNV KEMA Energy & Sustainability, Arnhem, June 5, 2013
- [4] Fernando Nuño: Przewody napowietrzne z miedzi stopowej. Europejski Instytut Miedzi, Styczeń 2014