

**EKSPERTYZA**

**„Mapa rozwoju dyscypliny Elektrotechnika”**

**Komitet Elektrotechniki PAN**

**Warszawa 2014**

## Spis treści

Spis treści .....	2
<b>1. Wstęp.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Aktualny stan i możliwe kierunki badań naukowych w dyscyplinie Elektrotechnika, warunkujące rozwój postępu technicznego .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Systemy Elektroenergetyczne .....</b>	<b>5</b>
2.1.1. Definicja.....	5
2.1.2 Tendencje światowe .....	6
2.1.3. Elektrownie .....	7
2.1.4. Sieci przesyłowe .....	15
2.1.5. Sieci rozdzielcze (dystrybucyjne).....	21
2.1.6 Bezpieczeństwo elektroenergetyczne.....	25
2.1.7 Sterowanie i automatyka systemowa.....	28
2.1.8. Sieci inteligentne – „ Smart grids” .....	34
2.1.9. Zadania nauki krajowej .....	38
<b>2.2 Wielkie Moce i Wysokie Napięcia .....</b>	<b>41</b>
2.2.1 Wysokie napięcia.....	43
2.2.2 Modernizacja konstrukcji elementów systemu elektroenergetycznego .....	44
2.2.3. Niezawodność elementów układu elektroenergetycznego .....	46
2.2.5 Przykłady wybranych problemów teoretycznych .....	49
2.2.6 Charakterystyka metodyczna tematu szczegółowego .....	50
<b>2.3 Materiały i Technologie Elektrotechniczne .....</b>	<b>50</b>
2.3.1 Materiały elektryczne .....	50
2.3.1.1. Tendencje światowe .....	51
2.3.1.2 Stan i perspektywy w Polsce .....	53
2.3.2. Elektrotechnologie .....	54
2.3.2.1. Tendencje światowe .....	54
2.3.2.2 Stan i perspektywy w Polsce .....	56
<b>2.4. Maszyny Elektryczne i Transformatory .....</b>	<b>56</b>
2.4.1. Maszyny elektryczne .....	56
2.4.1.1. Aktualne zadania badawcze .....	57
2.4.2. Transformatory energetyczne .....	61
2.4.2.1 Aktualne zagadnienia badawcze .....	61
2.4.2.2. Problematyka elektromagnetyczna w projektowaniu transformatorów .....	62
2.4.2.3. Diagnostyka eksploatacyjna transformatorów energetycznych .....	63
2.4.2.4. Proponowana tematyka badań w zakresie transformatorów .....	64
<b>2.5 Trakcja Elektryczna i Napęd Elektryczny Pojazdów .....</b>	<b>66</b>
2.5.1 Strategiczna rola trakcji elektrycznej.....	66
2.5.2 Trakcja sieciowa .....	67
2.5.3 Trakcja autonomiczna.....	71
2.5.4 Trakcja elektryczna a przemysł krajowy .....	72
2.5.5 Preferowane kierunki badań w Polsce .....	73
<b>2.6 Energoelektronika i Napęd Elektryczny.....</b>	<b>75</b>
2.6.1 Krótka diagnoza stanu .....	75
2.6.2 Stan obecny i trendy rozwojowe .....	76
2.6.3 Kierunki badań wynikające z aktualnej polityki UE .....	78
2.6.4 Preferowane kierunki prac i badań w Polsce .....	79
<b>2.7 Elektrotermia i Technika Świetlna.....</b>	<b>80</b>
2.7.1 Elektrotermia. Wprowadzenie .....	80

2.7.2 Tendencje światowe .....	81
2.7.3 Perspektywiczne zadania badawcze w Polsce .....	81
2.7.4 Elektrotermia w krajowej strategii inteligentnej specjalizacji .....	88
2.7.5 Technika Świetlna. Wprowadzenie .....	89
2.7.6 Stan techniki świetlnej w Polsce w roku 2014 .....	90
2.7.7 Tendencje światowe w technice świetlnej.....	92
2.7.8 Perspektywiczne zadania badawcze z techniki świetlnej w Polsce .....	93
<b>3. Kształcenie wykwalifikowanych kadr na kierunku Elektrotechnika.....</b>	<b>95</b>
3.1 Umieszczenie kierunku ELEKTROTECHNIKA w obszarze kształcenia.....	95
3.1.1 Cel ogólny kształcenia .....	95
3.1.2 Ocena aktualnie realizowanych studiów dwustopniowych.....	96
3.2 Podsumowanie dotyczące edukacji w zakresie elektrotechniki .....	98
3.3 Propozycje zmian w zakresie dydaktyki.....	100
<b>Dodatek D1 - Badania Nieniszczące Metodami Elektromagnetycznymi .....</b>	<b>102</b>
D1.1 Wstęp.....	102
D1.2 Stan obecny .....	103
D1.3 Plan na przyszłość .....	105

**Redakcja:**

prof. dr hab. inż. Tadeusz Citko, *Politechnika Białostocka*.  
Wiceprzewodniczący Komitetu Elektrotechniki PAN.

prof. dr hab. inż. Andrzej Demenko, *Politechnika Poznańska*,  
Przewodniczący Komitetu Elektrotechniki PAN.

**Redakcja techniczna:**

dr inż. Mariusz Barański, *Politechnika Poznańska*.

# 1. Wstęp

*Redakcja naukowa: prof. dr hab. inż. Tadeusz Citko, Politechnika Białostocka*

W nawiązaniu do §1 ust.1. pkt.1. Regulaminu Komitetu Elektrotechniki PAN – „Komitet w szczególności może: wyrazić opinię we wszystkich sprawach istotnych dla nauki i rozwoju społeczno-gospodarczego kraju w zakresie działania Komitetu”.

Do istotnych uwarunkowań określających rozwój społeczno-gospodarczy związany z każdą dyscypliną należą:

1. Zasoby wiedzy wynikające ze stanu prowadzonych badań naukowych będące podstawą planowania i projektowania przedsięwzięć.
2. Zapotrzebowanie społeczno-gospodarcze na rezultaty przedsięwzięć określane wielkością rynku zbytu.
3. Zasoby kapitałowe powiązane z rachunkiem ekonomicznym określającym rentowność i ryzyko ekonomiczne przedsięwzięcia.
4. Zasoby kadrowe w tym szczególnie kadry wysokokwalifikowanej.
5. Polityka Państwa wynikająca z konieczności ochrony środowiska, potrzeby realizacji zrównoważonego rozwoju kraju, itd.

W zakresie kompetencji KE PAN znajduje się 1 i 4 z wymienionych uwarunkowań. Stąd niniejsze opracowanie jest w szczególności poświęcone tym dwóm uwarunkowaniom. Przedstawia ono stan i potrzeby rozwoju badań naukowych oraz postępu technicznego, a także problemy dotyczące procesu kształcenia wysokokwalifikowanych kadr w Polsce na tle tendencji obserwowanych w świecie. Jest to materiał wyjściowy do rozwinięcia i wykorzystania przez Instytucje i Organizacje zaangażowane w proces społeczno-gospodarczego rozwoju kraju. Stąd adresatami opracowania są: Polska Akademia Nauk (prezydium, Wydział IV PAN, wybrane komitety naukowe i problemowe), minister właściwy ds. gospodarki, minister właściwy ds. nauki i szkolnictwa wyższego, prezes Urzędu Regulacji Energetyki, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Narodowe Centrum Nauki, wydziały elektryczne uczelni technicznych, instytuty przemysłowe i branżowe, zarządy największych spółek elektroenergetycznych i producenci urządzeń elektroenergetycznych.

Opracowanie jest rezultatem dyskusji przeprowadzonych w ramach poszczególnych sekcji KE, a główni Autorzy są wymienieni w poszczególnych rozdziałach powiązanych ze specjalizacją każdej z sekcji.

## **2. Aktualny stan i możliwe kierunki badań naukowych w dyscyplinie Elektrotechnika, warunkujące rozwój postępu technicznego**

Elektrotechnika obejmuje problemy związane z: wytwarzaniem, dostarczaniem i gospodarowaniem energią elektryczną oraz przetwarzaniem i użytkowaniem energii elektrycznej w działalności gospodarczej i przemysłowej. Specyfika i różnorodność problemów wymaga by analizę przedłożyć w odniesieniu do poszczególnych kierunków działalności indywidualnie. Podstawowe kierunki działalności reprezentowane są przez poszczególne Sekcje Komitetu Elektrotechniki PAN Stąd w kolejnych podrozdziałach prezentowany jest materiał opracowany przez kolejne sekcje pod redakcją naukową przewodniczących sekcji.

### **2.1. Systemy Elektroenergetyczne**

*Redakcja naukowa: prof. dr hab. inż. Zbigniew Szczerba, Politechnika Gdańska.*

*Autorzy*

*Rozdział 1 i 2: prof. dr hab. inż. Zbigniew Szczerba, Politechnika Gdańska,*

*Rozdział 3: prof. dr hab. inż. Maciej Pawlik, Politechnika Łódzka, uzupełnienie – prof. dr hab. Inż. Jacek Marecki Politechnika Gdańska, prof. dr hab. inż. Bolesław Zaporowski, Politechnika Poznańska,*

*Rozdział 4: prof. dr hab. inż. Marian Sobierajski Politechnika Warszawska, uzupełnienie – dr hab. inż. Kazimierz Wilkosz, Politechnika Wroclawska,*

*Rozdział 5: prof. dr hab. inż. Józef Lorenc Politechnika Poznańska, dr inż. Waldemar Szypra, AGH,*

*Rozdział 6: prof. dr hab. inż. Zbigniew Szczerba, Politechnika Gdańska,*

*Rozdział 7: prof. dr hab. Inż. Zbigniew Lubośny, Politechnika Gdańska,*

*Rozdział 8: prof. dr hab. Inż. Zbigniew Lubośny, Politechnika Gdańska,*

*Rozdział 9: prof. dr hab. inż. Jacek Wańkiewicz, Instytut Energetyki.*

#### **2.1.1. Definicja**

Istnienie i rozwój nowoczesnego społeczeństwa z organizacją państwową, są uwarunkowane zaopatrzeniem w energię. To zaopatrzenie zapewnia *system energetyczny*, w skład którego wchodzi:

- Podsystem paliw stałych.
- Podsystem ciekłych.
- Podsystem paliw gazowych.
- Podsystem elektroenergetyczny (zwany *systemem elektroenergetycznym*).
- Podsystemy energii odnawialnej.

Wymienione systemy nakładają się wzajemnie, a system elektroenergetyczny jest systemem najsilniej warunkującym funkcjonowanie nowoczesnego społeczeństwa.

**System elektroenergetyczny:** Zbiór wzajemnie powiązanych elementów, służących do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej oraz do sterowania tym zbiorem, w celu zapewnienia bezpieczeństwa i jakości dostawy energii odbiorcom.

*Krajowe systemy elektroenergetyczne* w Europie łączą się w, obejmujący niemal cały kontynent, europejski system elektroenergetyczny ENTSOE, sięgający do Północnej Afryki.

### 2.1.2 Tendencje światowe

Atrakcyjność użytkowania energii elektrycznej oraz, zainicjowana na początku XX wieku, tendencja stosowania prądu przemiennego i łączenia elektrowni do pracy równoległej, przyniosła ewidentne korzyści techniczne i ekonomiczne. Powstawały małe systemy, które łączono w coraz większe, aż do obejmujących całe kraje. Jedynie w słabo rozwiniętych krajach afrykańskich, południowo amerykańskich, niektórych azjatyckich oraz w krajach o dużych, słabo zaludnionych obszarach, nie powstały krajowe systemy elektroenergetyczne. Działania prywatyzacyjne, ale i antymonopolistyczne, nie zahamowały tej tendencji, ale umożliwiły równoprawny udział wielu partnerów w strukturze systemu elektroenergetycznego.

Pojawiające się koncepcje „prosumenckie”, dyskutowane również w Kraju [1] mogą stanowić jedynie niewielką część bilansu zapotrzebowania na energię elektryczną i mogą stanowić dodatek do sprawdzonych struktur nowoczesnych systemów elektroenergetycznych. Niektóre koncepcje prosumenckie przewidują „zmiernych roli systemu elektroenergetycznego”. W rzeczywistości to system elektroenergetyczny, łączący prosumentów zapewni niezbędne zachowanie bilansu mocy pobieranej i wytwarzanej. Niektóre działania zwolenników elektroenergetyki prosumenckiej powodują wystąpienia przeciw budowie elektrowni, co może być niebezpieczne dla gospodarki

Rozpowszechniająca się technika przesyłu prądem stałym i stosowania energoelektroniki wielkich mocy, umożliwia łatwe łączenie podsystemów i niewielkich systemów (w tym wysp) w wielkie systemy.

Zgodnie z teorią systemów, *system elektroenergetyczny* jest systemem wielkim z uwagi na rozległość geograficzną, liczbę elementów, liczbę powiązań, liczbę zmiennych stanu itd.

### 2.1.3. Elektrownie

#### *Tendencje światowe.*

Według raportów World Energy Outlook WEO-2012 i WEO-2013, publikowanych corocznie przez Międzynarodową Agencję Energetyczną (IEA), paliwa kopalne będą nadal zaspokajać przeważającą część światowego zapotrzebowania na energię w wymiarze globalnym, wpływając na powiązania pomiędzy energią, środowiskiem i zmianami klimatu.

Prognozy IEA wskazują, że na świecie rośnie i będzie dalej rosło zużycie węgla, który jest źródłem najtańszej energii elektrycznej. W latach 2010÷2012 wzrosło ono o 21% w Indiach, o 14% w Chinach, o 11% w Rosji i o 3% w Niemczech. Co prawda w USA spadło, i to aż, o 14%, ale jest to wynik znaczącego wzrostu produkcji taniego gazu ze złóż niekonwencjonalnych. Unia Europejska próbuje wprawdzie odżegnywać się od węgla, ale również zwiększyła w ostatnich latach import tego paliwa. W strukturze paliwowej elektroenergetyki na świecie od dziesiątków lat niezmiennie dominuje węgiel. Światowa produkcja energii elektrycznej z węgla w 2011 roku wyniosła 9144 TWh, co stanowi 41,3% całości produkcji świata (22126 TWh). Wg VGB Power udział węgla w światowej produkcji energii elektrycznej w 2035 roku jeszcze wzrośnie – do 43,5%, tj. do ok. 13700 TWh.

Paliwem, które znacznie zwiększa swój udział w światowym bilansie do 2035 r., jest gaz ziemny. Zarówno czynniki po stronie podaży, jak i popytu wskazują – według raportów WEO – na ogromną przyszłość gazu ziemnego, w tym gazu niekonwencjonalnego. Poziom światowego handlu gazem do 2035 roku podwaja się, z czego jedna trzecia przyrostu kierowana jest do Chin. Na gaz ze źródeł niekonwencjonalnych (gaz łupkowy, tight gas) przypada aktualnie połowa szacowanych zasobów surowca. Korzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego jest to, że zasoby gazu niekonwencjonalnego są znacznie bardziej rozproszone geograficznie niż zasoby gazu konwencjonalnego. Przykładem jest tu Polska, na której terytorium znajdują się prawdopodobnie jedne z większych złóż gazu łupkowego. Bardzo wstępne wyniki wierceń są na tyle zachęcające, że resort gospodarki w przyszłym roku ma się zająć aktualizacją polityki energetycznej z uwzględnieniem gazu łupkowego i co za tym idzie rozwoju elektroenergetyki opartej na gazie ziemnym.

Oczywiście dalej będą się rozwijać odnawialne źródła energii, które w sektorze elektroenergetyki stanowić będą w 2035 r. ok. połowy nowych mocy zainstalowanych i ich udział w „energymix” paliwowym światowej elektroenergetyki w 2035 roku przekroczy 30%. Na Chiny i Unię Europejską, główne siły napędowe rozwoju energetyki OZE, przypadnie prawie połowa wzrostu produkcji z tych źródeł.

Czynnikiem napędzającym produkcję energii elektrycznej z OZE są strategie rządowe, w tym przede wszystkim subsydiowanie.

Energetyka jądrowa, podobnie jak odnawialne źródła energii, pod względem oddziaływania na środowisko traktowana jest, jako źródło bezemisyjne. Po awarii w Fukushima przeciwnicy opcji jądrowej uzyskali poparcie dla swych tez o ryzykowności stosowanych rozwiązań, ale mimo to energetyka jądrowa rozwija się nadal ze względu na jej potencjał w ograniczaniu emisji CO<sub>2</sub> i spełnianiu celów narodowych w tej dziedzinie. W światowym „energymix” paliwowym energia jądrowa stanowi obecnie 18%, a w Unii Europejskiej nawet 30%. W 2013 roku, w 31 krajach świata znajdowało się w eksploatacji 437 reaktorów jądrowych o łącznej mocy ok. 390 GW, w budowie znajduje się dalsze 67, a ok. 200 jest planowanych do uruchomienia do 2030 roku. Europa ze 183 blokami jądrowymi stanowi blisko połowę aktywów jądrowych świata; w 16 krajach są budowane bądź planowane nowe bloki jądrowe.

Jednym z ważnych czynników rozwoju energetyki jądrowej jest jej efektywność ekonomiczna, która zawsze jest ważnym kryterium podejmowania decyzji inwestycyjnych. Elektrownie jądrowe mają strukturę kosztów, która charakteryzuje się wysokimi nakładami na budowę i niskimi kosztami eksploatacji. Dlatego istniejące elektrownie jądrowe są oceniane, jako źródła taniej energii elektrycznej. Efektywność ekonomiczna nowobudowanych elektrowni jądrowych jest jednak obciążona drogą i długotrwałą inwestycją.

#### *Stan obecny i perspektywy rozwoju w Polsce.*

Powyższe tendencje na światowych rynkach energetycznych są ważnymi wskazówkami dla dalszego rozwoju krajowego sektora wytwórczego energii elektrycznej. Struktura paliwowa krajowej elektroenergetyki (tzw. „energymix”) wymaga odejścia od monostruktury węglowej na rzecz innych nośników energii, tj. gazu, energii odnawialnej i w przyszłości energii jądrowej. Wynika to zarówno z potrzeby spełnienia wymagań pakietu klimatyczno-energetycznego Unii Europejskiej, określanego skrótem 3x20% do 2020 roku, jak i związanego z tym bezpieczeństwa energetycznego kraju. Zachowanie i umocnienie bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej dla krajowej gospodarki nakazuje jednak, aby zmiany w miksie energetycznym dokonywać stopniowo, z uwzględnieniem kosztów sektora energetyki i całej gospodarki oraz w oparciu o ocenę surowcowego potencjału kraju, tj. węgla kamiennego, a przede wszystkim węgla brunatnego.

Zasoby rodzimych paliw, czyli węgla kamiennego i brunatnego, decydują o tym, że Polska jest dziś w gronie najbardziej bezpiecznych energetycznie krajów UE. Poziom



zależności Polski od importu energii jest dzisiaj 2-krotnie niższy od średniej unijnej. W warunkach Polski, której energetyka oparta jest na węglu, niezwykle istotne jest m.in. jednoznaczne stwierdzenie Raportów WEO wskazujących, że technologia wychwytywania i składowania CO<sub>2</sub> (CCS - Carbon Capture and Storage) zacznie być może odgrywać rolę dopiero pod koniec okresu objętego prognozą, tj. przed rokiem 2035. Raport WEO-2012 wskazuje na możliwość istotnego ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> drogą zastąpienia przestarzałych, nieefektywnych elektrowni węglowych nowymi blokami energetycznymi w zaawansowanej technologii na parametry nadkrytyczne i ultranadkrytyczne. Ta opcja rozwoju energetyki węglowej jest wskazywana jako podstawowa także przez VGB PowerTech e.V. (Stowarzyszenie Eksploatatorów Dużych Elektrowni), do którego należy 478 firm z 34 krajów, reprezentujących elektrownie o łącznej mocy 520 GW.

Także najnowszy raport specjalny w ramach serii World Energy Outlook pt. „Redrawing the Energy-Climate Map”, opublikowany w czerwcu 2013 r. proponując wdrożenie czterech strategii, które pozwolą ograniczyć długoterminowy wzrost średniej globalnej temperatury do 2°C, wskazuje na zaprzestanie budowania elektrowni węglowych na podkrytyczne parametry pary i ograniczenie wykorzystania najmniej efektywnych istniejących elektrowni drogą zastępowania ich nowymi wysokosprawnymi blokami. Stopniowe zmniejszanie emisji CO<sub>2</sub> poprzez rozwój technologii wytwórczych energii elektrycznej należy więc traktować jako podstawową opcję, która prowadzi do istotnej redukcji wszelkich emisji (także związków siarki, azotu i pyłu), a także - co niemniej istotne - do ochrony zasobów naturalnych.

Zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej dla krajowej gospodarki w warunkach rosnącego udziału niestabilnych odnawialnych źródeł energii, a także utrzymanie go w przyszłości wymusza więc rozwój krajowego parku elektrowni węglowych drogą zastępowania starych, wyeksploatowanych jednostek wytwórczych przez nowe, zaawansowane technologicznie bloki węglowe. Potrzebę tę wzmacnia fakt konieczności odstawienia po 2016 r. ok. 4000,4500 MW w przestarzałych jednostkach nie spełniających wymagań środowiskowych dyrektywy Unii Europejskiej. Od pewnego poziomu zużycia obiektu nie ma bowiem sensu inwestowanie w rewitalizację i bardzo drogie instalacje ochrony środowiska w starych jednostkach. Trzeba inwestować w nowe wysokosprawne moce, aby poza bezpieczeństwem elektroenergetycznym i efektywnością ekonomiczną sprostać rosnącym wymaganiom ochrony klimatu.

Każdy nowy krajowy blok energetyczny, opalany węglem (kamiennym lub brunatnym) musi więc być blokiem nadkrytycznym z „rodziny 600°C”, tzn. na parametry z górnego przedziału osiąganych dziś temperatur dla materiałów konstrukcyjnych, opartych na stali, tj. 600÷620°C, a w bliskiej przyszłości 650°C. Gwarantuje to osią-

gnięcie sprawności netto wytwarzania energii elektrycznej na poziomie 45÷46%, co wiąże się z ograniczeniem emisji CO<sub>2</sub> do poziomu poniżej 750 kg/MWh, czyli o blisko 30% mniejszego od wycofywanych z eksploatacji bloków węglowych o sprawności 32÷33%. Musi to być ponadto blok zaprojektowany w wersji „capture-ready”, przewidujący wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla (technologie CCS) w przyszłości, kiedy instalacje takie będą opanowane technicznie, dostępne komercyjnie i znajdą uzasadnienie ekonomiczne.

Poza wysoką sprawnością, spełniającą oczekiwania zarówno ekonomiczne, jak i środowiskowe, niemniej istotnym powodem, dla którego konieczny jest udział w systemie elektroenergetycznym odpowiednio dużej liczby źródeł energii stabilizujących sieć, a więc elektrowni opalanych węglem (ale także gazem) jest rosnący udział źródeł odnawialnych, a zwłaszcza niestabilnych elektrowni wiatrowych (i w przyszłości fotowoltaicznych). Tworzy on w systemie elektroenergetycznym sytuację, w której nie tylko po stronie odbiorców energii (popytowej), ale także po stronie wytwórców występują coraz głębsze i coraz częstsze wahania, trudne do przewidzenia z odpowiednią pewnością.

Zmiana struktury paliwowej jest jednak w Polsce konieczna. Stąd w pierwszej kolejności należy zwiększyć udział elektrowni opalanych gazem. Aktualnie w elektrowniach i elektrociepłowniach opalanych gazem jest zainstalowanych w Polsce ok. 880 MW, co daje ok. 3-procentowy udział w strukturze paliwowej produkcji krajowego sektora wytwarzania energii elektrycznej, podczas gdy w Unii Europejskiej udział ten jest na poziomie 20%. W budowie znajdują się dwa duże bloki gazowo-parowe klasy 440 MW w Stalowej Woli i Włocławku oraz ogłoszone są przetargi na kilka dalszych bloków (EC Gorzów Wlkp. EC Pomorzany, EC Bydgoszcz). Część ekspertów ocenia, że Polska już w latach 2015-2020 będzie znaczącym producentem gazu łupkowego, uruchomiony będzie też terminal LNG, co powinno skłaniać do zmian w planach inwestycyjnych na korzyść energetyki gazowej.

Gaz jako paliwo dla elektrowni ma trzy fundamentalne zalety: niską emisyjność, niskie nakłady inwestycyjne i krótki czas budowy. Emisja CO<sub>2</sub> na jednostkę produkowanej energii w układach gazowych wynosi ok. 640 kg/MWh, zaś w układach kombinowanych gazowo-parowych tylko ok. 420 kg/MWh. Relatywnie niski koszt inwestycyjny oraz krótki czas budowy stwarza mniejsze ryzyko dla inwestora i pozwala stosunkowo szybko wypełnić lukę, wynikającą z długotrwałości procesu budowy wielkoskalowych źródeł węglowych, a tym bardziej jądrowych. Istotną zaletą jest także najwyższa spośród elektrowni spalających paliwa organiczne sprawność (do 60% przy wytwarzaniu tylko energii elektrycznej oraz ok. 90% w kogeneracji). Ponadto elektrownie gazowe zdolne są pokryć zapotrzebowanie zarówno w podstawie

wykresu obciążenia, jak i w strefie szczytowej, a szybkość reakcji w czasie rzeczywistym czyni je też dobrym partnerem dla źródeł wiatrowych.

Do rozwoju elektrowni i elektrociepłowni gazowych i gazowo-parowych przyczynił się przede wszystkim postęp w budowie turbin gazowych. Przyczyniły się do tego następujące zalety turbin gazowych: wysoka sprawność (szczególnie w układach kombinowanych gazowo-parowych), elastyczność pracy przy zmianach obciążenia, niskie koszty inwestycyjne, krótki czas budowy, niezawodność pracy oraz niska emisyjność substancji szkodliwych do środowiska naturalnego.

Konieczność dalszego rozwoju odnawialnych źródeł energii w Polsce nie budzi więc wątpliwości. Ich udział – zgodnie z jednym z trzech celów pakietu klimatycznego UE - powinien sięgnąć w 2020 roku poziomu 20% (dla Polski 15%). Zdaniem specjalistów istnieje możliwość zainstalowania w krajowym systemie elektroenergetycznym do 2020 roku ok. 7000 - 11000 MW mocy w elektrowniach wiatrowych (do końca 2013 r. przyłączono do sieci 3389 MW). W zależności od stopnia realizacji tych zamierzeń można oczekiwać w 2020 roku produkcji energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych w przedziale 12,5÷17,5 TWh rocznie.

Rozwój dużej energetyki wiatrowej w Polsce jest z jednej strony inspirowany trendami w Unii Europejskiej, która wspiera tę gałąź przemysłu, z drugiej zaś presją firm zachodnioeuropejskich, posiadających technologię oraz moce produkcyjne. Niestety ta tendencja nie sprzyja w żaden sposób rozwojowi polskiego potencjału wytwórczego.

W chwili obecnej rola energii wiatrowej w bilansie energetycznym Polski jest niewielka. Zdaniem ekspertów duży potencjał tkwi w podjęciu tematyki małych wiatraków dla gospodarstw indywidualnych, o ile spotka się to z masowym zainteresowaniem. O sukcesie decydować będą dwa kryteria, tj. niski koszt inwestycyjny i prostota instalacji. Niska prędkość wiatru w naszym kraju wskazuje na potrzebę opracowania własnych konstrukcji (o niskiej prędkości startowej), które będą projektowane i produkowane w kraju. Należy zwrócić uwagę na szansę stworzenia kierunku specyficznego dla Polski, który skoncentrowałby się na małej energetyce wiatrowej (3-10 kW mocy pojedynczego wiatraka, odpowiadającego zapotrzebowaniu dużych gospodarstw domowych). Jest to kierunek, który w Europie i w USA rozwija się nawet bardziej dynamicznie niż duża energetyka wiatrowa i jest to szansa dla Polski.

Na szeroką skalę powinna być stosowana w Polsce biomasa, głównie pozyskiwana z upraw rolniczych (agroenergetyki). Ocenia się, że w warunkach polskich rocznie powstaje ponad 20 mln ton słomy odpadowej, ponad 4 mln ton drewna odpadowego i ponad 6 mln ton osadów ściekowych w przemyśle celulozowo-

papierniczym, spożywczym i w miejskich odpadach organicznych. Daje to około 30 mln ton biomasy rocznie, co jest energetycznie równoważne 15-20 mln ton węgla. Ilość energii możliwej do uzyskania z biomasy jest znacząca, a technologia wykorzystywania biomasy jest znana i nieskomplikowana. Problemy z powszechnym wykorzystaniem biomasy powodowane są: rozproszeniem źródeł pozyskiwania, różnorodnością jej postaci oraz różnorodnością wytwórców odbiorców biomasy i energii. Wydaje się ponadto, że biomasa powinna być w dużej części przetwarzana na biogaz, bowiem w kogeneracyjnych źródłach biogazowych (agregatach kogeneracyjnych spalinowych) jest szansa na użyteczne wykorzystanie 85% energii paliwa biogazowego.

Spośród kilku różnych technologii wykorzystujących energię biomasy tylko ciepłownicze bloki z turbinami parowymi średniej i małej mocy są na etapie rozwoju pełnej dojrzałości komercyjnej. Ciepłownicze bloki ORC (Organic Rankine Cycle) oraz ciepłownicze bloki z silnikami gazowymi zintegrowane z biologicznymi generatorami biometanu są na etapie budowy jednostek demonstracyjnych, a ciepłownicze bloki wykorzystujące proces zgazowania biomasy są dopiero na etapie badań pilotowych i przed rokiem 2030 raczej nie osiągną dojrzałości komercyjnej.

Obserwowany stan rozwoju polskiej energetyki wodnej nie jest dobry. Na stan ten składa się cały szereg przyczyn. Najważniejszą z nich jest powszechny brak zrozumienia dla walorów, jakie reprezentuje energetyka wodna w porównaniu z innymi odnawialnymi źródłami energii. Jaskrawym przykładem jest sprawa Kaskady Dolnej Wisły. Pierwotny projekt Kaskady przewidywał zbudowanie 8 elektrowni o łącznej mocy 1340 MW i produkcji rocznej 3880 GWh. Próby wznowienia budowy Kaskady spotykają się jednak ze sprzeciwami organizacji proekologicznych, pragnących zachować Wisłę w stanie pierwotnym i wysuwających wręcz żądania rozebrania stopnia Włocławek. W tej sytuacji w roku 1999 powstała koncepcja zakończenia zabudowy Dolnej Wisły stopniem Nieszawa z elektrownią przepływową o mocy 70 MW. W istniejącej sytuacji rozwój polskiej hydroenergetyki z konieczności będzie się ograniczał do budowy małych elektrowni wodnych.

Reasumując, możliwe jest uzyskanie w kraju w 2020 roku poziomu 25,5÷31 TWh energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych (z wiatru 12,5÷17,5 TWh, z biomasy ok. 10 TWh i z wody ok. 3÷3,5 TWh). Podobny poziom przewidywany jest w dokumencie Ministerstwa Gospodarki. Nie można także wykluczyć pojawienia się ok. 2020 roku niezwykle dynamicznie rozwijającej się już w UE fotowoltaiki, choć jej udział w bilansie będzie mało znaczący ze względu na niewielką liczbę dni słonecznych w Polsce (ok. 1600 godz.) oraz duży udział promieniowania rozproszonego (ok. 50% promieniowania całkowitego). Rozwijając OZE, trzeba jednak mieć na uwadze, że

obecnie żadna dostępna technologia odnawialnych źródeł energii, z wyjątkiem technologii wodnej, nie jest ekonomicznie opłacalna. Elektrownie wiatrowe, biomasowe i biogazowe funkcjonują dzięki subsydiowaniu rządowemu.

Jednostkowe koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach fotowoltaicznych należą do najwyższych z wszystkich rodzajów źródeł energii elektrycznej. Dlatego wydaje się, że opłacalność tych przedsięwzięć inwestycyjnych może mieć miejsce w przypadku gdy inwestor (producent) będzie zużywał w przeważającej części wytworzoną energię elektryczną na potrzeby własne. Wtedy można zastosować korzystniejszy dla inwestorów rachunek kosztów unikniętych.

Energia jądrowa zapewne nieuchronnie stanie się nowym składnikiem krajowego bilansu energetycznego i stanowić będzie w przyszłości jeden ze stabilizatorów bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej dla gospodarki. Rząd RP jest zdeterminowany uruchomić pierwszą elektrownię jądrową w Polsce ok. 2024 roku. Obecnie trwają dyskusje nad wyborem technologii wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni z reaktorami jądrowymi trzeciej generacji. Wiadomo już, że kilka światowych koncernów energetycznych ubiega się o kontrakty na budowę takiej elektrowni w Polsce.

Reasumując, można stwierdzić, że krajowy sektor elektroenergetyki spełni zapewne wymagania pakietu klimatyczno-energetycznego „3x20” do 2020 roku, a zwłaszcza warunek ograniczenia o 20% emisji CO<sub>2</sub> jeszcze bez udziału energetyki jądrowej. Najskuteczniejszą drogą do osiągnięcia tego celu będzie zrównoważona struktura paliwowa („energymix”), uwzględniająca udział wielkoskalowych bloków energetycznych na parametry nadkrytyczne, rozwój odnawialnych źródeł energii oraz zwiększenie udziału niskowęglowego paliwa, jakim jest gaz. Stanowić to będzie najlepszą podstawę dla bezpieczeństwa elektroenergetycznego, przyjaznego środowisku i uzasadnionych ekonomicznie kosztów dostarczania energii.

Po roku 2025, czyli za ok. 12 lat, gdy będzie już w pełni wprowadzony obowiązek zakupu uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, będzie w Polsce konieczny, ze względów ekologicznych oraz uzasadniony ekonomicznie i wynikający z potrzeby dywersyfikacji paliwowej w grupie elektrowni systemowych, udział energetyki jądrowej w produkcji energii elektrycznej.

### ***Zadania nauki w Polsce - preferowane obszary badawcze (Elektrownie)***

- Identyfikacja, badania i sprawdzenie nowych koncepcji wzrostu sprawności węglowych technologii wytwarzania energii elektrycznej i ciepła.

- Badania możliwości zwiększenia elastyczności i obniżenia minimalnego obciążenia wielkoskalowych bloków energetycznych.
- Opracowanie algorytmów i programów do pełnej i wiarygodnej symulacji pracy bloku energetycznego o złożonej strukturze technologicznej w różnych stanach obciążenia i z uwzględnieniem procesów separacji CO<sub>2</sub>.
- Opracowanie nowych metod i systemów nadzoru eksploatacyjnego, metod oceny ryzyka oraz planowania gospodarki diagnostyczno-remontowej bloków energetycznych nowych generacji.
- Analizy optymalizacyjne, badania systemowe i techniczno-ekonomiczne, przygotowujące wprowadzenie do polskiej energetyki bloku 50+ (bloku o sprawności powyżej 50%).
- Badania pilotowe procesów wychwytu CO<sub>2</sub> ze spalin dla różnych klas sorbentów, w tym badanie i optymalizacja procesu membranowego usuwania CO<sub>2</sub>.
- Badanie i optymalizacja procesu wychwytywania CO<sub>2</sub> przy zastosowaniu innowacyjnego rozwiązania opartego o absorpcję fizyko-chemiczną.
- Badania studialne i projekty technologiczne integracji instalacji wychwytu CO<sub>2</sub> z obiegami węglowych elektrowni ciepłych.
- Rozwój nowych materiałów na bazie Ni dla długoterminowej eksploatacji w temperaturze pary w zakresie od 700-720°C.
- Dalszy rozwój materiałów ferrytyczno-martenzytycznych dla elementów pracujących w niższych temperaturach celem zmniejszenia zapotrzebowania na drogą super-stopę na bazie niklu.
- Zademonstrowanie w pełnej skali procesu suszenia węgla brunatnego ciepłem niskotemperaturowym.
- Badania technologiczne pyłowego oxy-spalania z recyrkulacją spalin w skali pilotowej.
- Opracowanie i weryfikacja w skali pilotowej procesów powierzchniowego i podziemnego zgazowania węgla.
- W zakresie skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w Polsce - prace, przede wszystkim w zakresie badań stosowanych i rozwojowych, nad następującymi technologiami kogeneracyjnymi:

- skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w kondensacyjnych blokach parowych na parametry nadkrytyczne z członom ciepłowniczym, opalanych węglem kamiennym,
- skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w ciepłowniczych blokach gazowo-parowych dużej i średniej mocy, opalanych gazem ziemnym,
- skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w ciepłowniczych blokach gazowo-parowych zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy,
- skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w ciepłowniczych blokach gazowych małej mocy (kogeneracyjnych źródłach rozproszonych) z silnikami gazowymi, w tym zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy,
- skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w ciepłowniczych blokach małej mocy (parowych i ORC opalanych biomasą).
- Optymalizacja układu potrzeb własnych bloku energetycznego dla odbudowy systemu po „blackoucie”.
- Aspekty techniczne i ekonomiczne magazynowania energii elektrycznej na przykładzie elektrowni wiatrowej.
- Współmienność generacji energii elektrycznej z farm wiatrowych i elektrowni fotowoltaicznych dla warunków polskich.
- Integracja rozproszonych źródeł energii z siecią zasilającą, w tym metody zwiększenia zdolności przyłączeniowej sieci i sposób przyłączenia źródeł.
- Rozwój technologii zasobnikowych wykorzystywanych do integracji źródeł rozproszonych z siecią zasilającą; analizy współpracy lokalnych źródeł energii z zasobnikami energii.
- Wykorzystanie rozproszonych źródeł i zasobników energii do świadczenia usług pomocniczych operatorowi systemu przesyłowego PSE (*ancillary services*) oraz do poprawy jakości zasilania.

#### **2.1.4. Sieci przesyłowe**

*Charakterystyka Krajowej Sieci Przesyłowej (KSP).*

Krajowa Sieć Przesyłowa (KSP) obejmuje ok. 80 linii 400 kV o długości ok. 6000 km, ok. 170 linii 220 kV o długości ok. 8000 km i ponad 110 stacji najwyższych napięć. Poprzez kabel prądu stałego o długości ok. 250 km KSP łączy się asynchronicznie z systemem elektroenergetycznym Szwecji. Liniami wymiany 220 kV

i 400 kV KSP połączona jest z sieciami przesyłowymi Niemiec, Czech i Słowacji. Istnieje również nie eksploatowana linia 750 kV o długości ok. 120 km, łącząca dawniej KSP z systemem byłego ZSRR. Sieć przesyłowa wyprowadza energię elektryczną z dużych elektrowni i przesyła ją na znaczne odległości. Obecna KSP to jednak niedoinwestowana sieć 400/220 kV, rezerwowana przez zamknięte długie ciągi linii 110 kV, co powoduje nadmierne straty przesyłowe w całym Krajowym Systemie Elektroenergetycznym.

KSP jest częścią paneuropejskiej sieci przesyłowej i dlatego jej zadaniem jest nie tylko zapewnienie dostaw energii odbiorcom krajowym, ale także współpraca z paneuropejskim systemem elektroenergetycznym. Oprócz znanych od dawna korzyści, wynikających z tej współpracy, dodatkowym uzasadnieniem jest ciągły przyrost w Europie generacji z odnawialnych źródeł energii: farm wiatrowych na lądzie i morzu, elektrowni słonecznych oraz rozproszonej generacji wodnej, wiatrowej, słonecznej, biogazowej. Zależność generacji odnawialnej od warunków pogodowych powoduje, w połączonych europejskich systemach elektroenergetycznych, gwałtowny wzrost generacji w obszarach o małym zapotrzebowaniu na energię elektryczną i wymusza konieczność tranzytu tej generacji do innych obszarów, w których lokalni odbiorcy mogą skonsumować tę energię. Odwrotna sytuacja odpowiada zbyt małej generacji odnawialnej i konieczności importu energii z odległych obszarów z konwencjonalnych elektrowni ciepłych (jądrowych, na węgiel kamienny lub brunatny). Rozważana jest również budowa dużych elektrowni słonecznych na Saharze, co w konsekwencji wymusi rozprowadzanie energii importowanej z Sahary między połączone europejskie systemy elektroenergetyczne. Zatem rozwój Krajowej Sieci Przesyłowej musi być skoordynowany z rozwojem sieci przesyłowych w pozostałych europejskich systemach elektroenergetycznych, w ramach ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). W ramach paneuropejskiej sieci w Polsce realizowane są połączenia liniami 400 kV KSP z pierścieniem bałtyckim oraz trzecie połączenie z niemieckim systemem elektroenergetycznym w rejonie Gubina. W paneuropejskiej sieci przesyłowej rozwijać się będą linie prądu stałego (HVDC) wiążące systemy krajów nadmorskich, wyprowadzające moc z morskich farm wiatrowych, stacje przekształtnikowe AC/DC/AC łączące asynchronicznie sąsiednie systemy. Konieczność wymuszania przesyłów mocy czynnej w kierunkach wschód-zachód i północ – południe powodować będzie instalowanie w paneuropejskiej sieci przesyłowej energoelektronicznych przekształtników UPFC oraz transformatorów z regulacją kątów napięć PST. W Polsce instalowane są już przesuwniki fazowe PST na północnym połączeniu z Niemcami w rejonie Krajnika i południowym w rejonie Turowa. Koordynacja przepływów mocy wymagać będzie tworzenia wielobszarowych



synchronizowanych pomiarów fazorów napięć i prądów w postaci systemów WAMS. Istnieje tu możliwość podejmowania badań we współpracy z uniwersytetami europejskimi, finansowanych z funduszy europejskich.

#### *Uwarunkowania rozwoju Krajowej Sieci Przesyłowej.*

Nadzór nad bezpieczeństwem dostaw energii elektrycznej sieciami przesyłowymi sprawuje Operator Systemu Przesyłowego (OSP). Podstawowe czynniki ryzyka dla bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej siecią przesyłową wynikają z następujących uwarunkowań:

- wzrost zapotrzebowania na moc elektryczną w lecie,
- wzrost generacji wiatrowej na wybrzeżu bałtyckim, a także pojawienie się farm wiatrowych na morzu,
- terytorialna zmiana rozmieszczenia elektrowni konwencjonalnych, powodowana wycofaniem przestarzałych jednostek wytwórczych, budową elektrowni jądrowych oraz budową nowych elektrowni konwencjonalnych,
- wydłużanie się procesów inwestycyjnych budowy nowych linii przesyłowych,
- wzrost kogeneracji i odnawialnej generacji rozproszonej przyłączanej do sieci 110 kV i średniego napięcia,
- możliwość okresowego wyodrębniania się autonomicznych systemów elektroenergetycznych pracujących równolegle z KSP, lecz zdolnych do pracy wyspowej,
- pojawienie się małych elektrowni w sieci średniego napięcia i mikrogeneracji w sieciach niskiego napięcia (prosumenci) oraz możliwość awaryjnego wydzielenia się mikrosieci.

#### *Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną.*

Wzrost gospodarczy oraz wzrost poziomu życia powoduje wzrost krajowego zużycia energii elektrycznej. Nowym zjawiskiem jest znacznie wyższy od przeciętnego wzrost zapotrzebowania na moc w okresie letnim w dużych aglomeracjach miejskich, m.in. warszawskiej, poznańskiej, wrocławskiej, krakowskiej i trójmiejskiej. Ponadto, letniemu wzrostowi zapotrzebowania na moc elektryczną towarzyszy znacznie wyższy wzrost zapotrzebowania na moc bierną (urządzenia klimatyzacyjne), co stwarza dodatkowe trudności w utrzymaniu wymaganych poziomów napięcia w sieci przesyłowej. Konieczne jest tu podejmowanie prac

badawczych nad zjawiskami wynikającymi z dużych zmian poboru mocy przez aglomeracje w różnych porach dnia i roku.

#### *Budowa nowych linii przesyłowych.*

Obecne uzupełnianie sieci przesyłowej istniejącymi ciągami przesyłowymi 110 kV obniża bezpieczeństwo dostaw energii i prowadzi do zwiększania strat przesyłowych. Wadą przesyłowych ciągów 110 kV jest fakt, że mogą ograniczać przesyły mocy po stronie nn, gdyż graniczny prąd obciążenia ciągu 110 kV łączącego różne stacje nn/110 kV determinuje krytyczny rozchył kątowy fazorów napięć w obu stacjach nn. Przekroczenie tego krytycznego rozchyłu może prowadzić do przeciążenia ciągu. Wskazane jest prowadzenie badań analizujących te zjawiska.

Konieczna jest budowa nowych linii 400 kV, które pozwolą stopniowo rozciąć zamknięte obwody sieci 110 kV i przywrócić prawidłowe funkcjonowanie dystrybucji energii w Polsce. Realne możliwości budowy nowych linii przesyłowych zawarte są w planach rozwoju sieci przesyłowej, opracowanych i realizowanych przez OSP. W wyniku tych planów następuje rozbudowa sieci na Wybrzeżu oraz wzmocnienie powiązań elektrycznych w korytarzach północ-południe i północ-centrum. Rozbudowana sieć przesyłowa pozwoli przesyłać nadmiar generacji wiatrowej z północy do odbiorców zlokalizowanych w centrum oraz na południu. Należy liczyć się z wydłużaniem się procesów inwestycyjnych, m.in. z powodu oporów społecznych i trudności w pozyskiwaniu lokalnych pozwoleń na budowę nowych obiektów energetycznych. Niewybudowanie na czas nowych linii przesyłowych uniemożliwi przeprowadzenie wymaganych modernizacji w sieci przesyłowej (np. stopniowa przebudowa linii 220 kV na 400 kV, modernizacja starych linii 400 kV, zastępowanie krótkich połączeń 110 kV krótkimi połączeniami 400 kV). Wskazane są tu interdyscyplinarne badania i ekspertyzy w celu zlikwidowania przeszkód prawnych.

Generacja rozproszona i wyodrębnianie się autonomicznych systemów elektroenergetycznych.

Polityka Unii Europejskiej zmierzająca w kierunku wzrostu generacji elektrycznej ze źródeł odnawialnych powoduje wzrost liczby kogeneracji i odnawialnych źródeł o mocy od kilku do kilkunastu MW, przyłączanych do sieci dystrybucyjnej 110kV i średnich napięć. Stwarza to warunki do tworzenia się w KSE bilansujących się podsystemów elektroenergetycznych, które mogą pracować równolegle z KSP lub okresowo, wyspowo. Będą to autonomiczne systemy zdolne do samodzielnej regulacji częstotliwości i mocy wymiany z innymi podsystemami. W sytuacjach uzasadnionych technicznie i ekonomicznie będą zdolne do intencjonalnego przechodzenia do pracy wyspowej, a następnie automatycznej synchronizacji z KSP.

Operator Systemu Przesyłowego powinien mieć możliwość zdalnego sterowania wytwarzaniem energii przez rozproszone źródła w systemach autonomicznych w czasie ich równoległej pracy. Konieczne jest podjęcie odpowiednich badań naukowych nad funkcjonowaniem autonomicznych systemów i ich współpracy z KSP w aspekcie regulacji częstotliwości i wymiany mocy oraz regulacji napięć.

#### *Prosumenci i mikro sieci.*

Zagrożenie deficytem mocy może spowodować wzrost ceny energii elektrycznej czyniąc opłacalnym budowanie przez indywidualnych odbiorców mikroinstalacji wytwórczych do 40 kW w sieciach niskiego napięcia, wykorzystujących ogniwa fotowoltaiczne, biogaz, wiatr i wodę. W sieciach niskich napięć mogą także pojawić się małe instalacje wytwórcze do 200 kW, wytwarzające energię elektryczną w ramach działalności gospodarczej. Natomiast do sieci średniego napięcia będą przyłączane małe elektrownie fotowoltaiczne i biogazowe o mocy do kilku MW. W konsekwencji w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym może pojawić się kilka milionów prosumentów produkujących energię na własne cele i wprowadzających nadwyżki do sieci dystrybucyjnej oraz liczne małe elektrownie, wprowadzające moc do sieci przesyłowej poprzez stacje nn/110 kV.

Konieczne są badania dotyczące opomiarowania oraz zdalnego sterowania wytwarzaniem energii przez mikroźródła i małe elektrownie. Mikro sieci na większym obszarze będą tworzyć elektrownie wirtualne. Konieczne jest tu prowadzenie badań naukowych dotyczących współpracy wirtualnych elektrowni z siecią przesyłową oraz ich udziału w regulacji częstotliwości Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.

#### *Monitoring obciążeń linii przesyłowych.*

W okresie lata przy wysokich temperaturach konieczne jest monitorowanie dopuszczalnej obciążalności linii przesyłowych. Posługiwanie się w takich sytuacjach sztywno ustalonymi granicznymi wartościami obciążeń jest nieracjonalne. Potrzebne jest wyznaczenie zdolności przesyłowych na podstawie faktycznie panujących warunków otoczenia. Wskazane jest modelowanie i symulowanie charakterystyk temperaturowo-obciążeniowych, które pozwolą na odniesienie możliwości przesyłowych nie tylko do przekroju przewodów, ale także do warunków otoczenia. Należy dążyć do tego, aby monitorowanie obciążalności linii nie tylko uwzględniało warunki temperaturowe (pogodowe), ale też dostarczało informacji o tym jak długo przeciążona linia (lub transformator) może być utrzymana w ruchu i co należy czynić dla ich odciążenia oraz jaki będzie skutek wyłączenia przeciążonych elementów

przesyłowych. Są to zagadnienia, które wymagają prowadzenia intensywnych badań naukowych.

#### *Likwidacja deficytów mocy biernej.*

Przesyły na duże odległości mocy czynnych i biernych wytworzonych w elektrowniach przy dużej reaktancji przesyłu wynikającej z niedostatecznej liczby połączeń równoległych może prowadzić do nadmiernych strat przesyłowych mocy biernej i w rezultacie do lokalnych deficytów mocy biernej. Alternatywą dla braku nowych linii przesyłowych OSP jest instalowanie w sieci przesyłowej dodatkowych źródeł mocy biernej w postaci baterii kondensatorów, układów SVC i STATCOM. Działaniom OSP w zakresie instalacji nowych źródeł mocy biernej w sieci przesyłowej powinny jednak towarzyszyć właściwe działania spółek dystrybucyjnych w zakresie kompensacji lokalnego poboru mocy biernej w sieci dystrybucyjnej (zużycie odbiorców i straty sieciowe). Konieczne są tu analizy ekonomiczne i techniczne oraz prace badawcze dotyczące wpływu sterowanych baterii kondensatorów, po stronie średniego napięcia w stacjach 110kV/SN, na wartości napięcia i straty przesyłowe w sieciach dystrybucyjnych.

#### *Kontrolowanie poboru mocy biernej w stacjach NN/110 kV.*

Aby nie dopuścić do deficytu mocy biernej w sieci przesyłowej konieczna jest kontrola wielkości przepływu mocy biernej z sieci przesyłowej do sieci dystrybucyjnej. W tym celu należy instalować odpowiednie układy pomiarowo-rozliczeniowe w węzłach sieci 400/110 kV i 220/110 kV. Konieczne jest tu opracowanie standardów w zakresie wymaganego stopnia kompensacji mocy biernej w sieci zamkniętej.

#### *Modernizacja linii przesyłowych.*

Podstawowym ograniczeniem dla wykorzystania linii przesyłowych 400/220 kV są dopuszczalne obciążalności przewodów oraz dopuszczalne zwisy. Skutecznym sposobem eliminacji tych ograniczeń mogą być w niektórych przypadkach działania modernizacyjne polegające na wymianie przewodów roboczych na przystosowane do pracy przy wyższej temperaturze (zwiększanie dopuszczalnej obciążalności przewodów) przy jednoczesnym podwyższeniu słupów (zmniejszanie zwisów). Pomocne mogą tu być analizy i ekspertyzy wskazujące linie, w których powinny mieć wymienione przewody.

### *Ograniczanie poboru mocy z KSP.*

W perspektywie najbliższych lat należy poważnie liczyć się z koniecznością okresowego wprowadzania ograniczeń poboru energii elektrycznej z powodu zbyt małych zdolności wytwórczych (ograniczenia na terenie całego kraju) lub z powodu zagrożenia bezpieczeństwa pracy sieci (w wybranych obszarach kraju). Istnieje pilna potrzeba analiz prawnych, ekonomicznych i technicznych związanych z następstwami wprowadzania przez OSP ograniczenia dostaw energii elektrycznej.

Należy rozważyć celowość rewizji uprawnień URE (Urzędu Regulacji Energetyki) do ograniczania cen energii Elektrycznej. Administracyjne ograniczanie cen, prowadzi do deficytów znanych z okresu komunizmu!

## **2.1.5. Sieci rozdzielcze (dystrybucyjne)**

### *Wprowadzenie.*

Do sieci rozdzielczych (dystrybucyjnych) zalicza się linie napowietrzne i kablowe, stacje transformatorowe, rozdzielnie, łączniki, kondensatory, dławiki oraz wszystkie urządzenia, których zadaniem jest rozdział energii elektrycznej pomiędzy różnorodnych odbiorców. Jest to część Systemu Elektroenergetycznego, obejmująca poziomy napięć wysokich (110 kV), średnich (SN) i niskich (nn), która w dużym stopniu odpowiada za pewność i jakość dostarczanej odbiorcom energii.

### *Sieci 110 kV.*

Głównym zadaniem tych sieci jest zasilanie stacji transformatorowo-rozdzielczych często określanymi jako Główne Punkty Zasilania (GPZ WN/ SN). W Polsce są to przede wszystkim linie napowietrzne z krótkimi odcinkami linii kablowych. Jakkolwiek majątek tych sieci należy do Operatorów Sieci Dystrybucyjnych (OSD) to generalnie podlegają one operatywnemu kierowaniu przez Operatora Sieci Przesyłowej (OSP).

Punkt neutralny tych sieci powinien być skutecznie uziemiony. W budowie linii napowietrznych najczęściej stosowane są tradycyjne konstrukcje wsporcze typu kratowego.

### *Sieci SN.*

Są to sieci, których napięcia mieszczą się w przedziale od 1 kV do 30 kV (60kV), w Polsce najczęściej spotykane poziomy to 15 i 20 kV. W zakresie sterowania siecią SN główną rolę pełnią Operatorzy Sieci Dystrybucyjnej (OSD). Sieci te pracują jako

otwarte (np. w układzie promieniowym) i przy braku lokalnej generacji - jako tory jednostronnie zasilane. Cechą charakterystyczną tych sieci jest to, że ich punkt neutralny nie jest bezpośrednio łączony z ziemią. W typowych rozwiązaniach stosowanych w Polsce wyróżnia się sieci z punktem neutralnym izolowanym od ziemi oraz z punktem neutralnym pośrednio uziemionym. Pośrednie uziemienie polega na zastosowaniu cewki Petersena (dławik kompensujący) lub rezystora (uziemienie przez rezystancję).

Kompensację doziemnych prądów pojemnościowych w sieciach SN realizuje się w oparciu o statyczny dławik z zaczepowym nastawianiem reaktancji. Relatywnie mała liczba zaczepów oraz brak możliwości zdalnej regulacji dławika to główne przyczyny słabego zestrojenia dławika i niedostatecznej kompensacji. W wielu sieciach, w których dokonywane są częste wyłączenia linii i eksploatacyjne zmiany konfiguracji kompensacja utrzymywana jest na poziomie znacznie odbiegającym od wartości wymaganych. Problem ten można znacznie złagodzić lub całkowicie rozwiązać stosując urządzenia kompensujące z regulacją automatyczną, w których procesem strojenia zajmuje się odpowiedni algorytm wykorzystujący informacje o zmianach parametrów doziemnych sieci. Tego typu urządzenia proponują firmy zagraniczne. Dużym wsparciem w zakresie wymiany dławików kompensujących powinien być również przemysł krajowy. W roku 2014 firma krajowa wprowadziła na rynek zintegrowany zespół do kompensacji prądów ziemnozwarciowych (BS KK), który może przyczynić się do szybszego i powszechnego przechodzenia w polskich sieciach dystrybucyjnych z kompensacji tradycyjnej na bardziej efektywniejszą i automatycznie dostrajaną do aktualnych potrzeb sieci. W urządzeniu tym zastosowano algorytm regulujący reaktancją kompensującą oparty o dyskretne pomiary parametrów doziemnych sieci. Należy i dokładna kompensacja ziemnozwarciowa stwarza bardzo dobre warunki do samoistnego wygaszania zwarcień nietrwałych (przemijających) oraz znacznie poprawia warunki ochrony przeciwporażeniowej w głębi sieci i w stacjach SN/nn.

Uziemienie przez rezystancję stosuje się przede wszystkim w miejskich sieciach kablowych, w których istnieją warunki ograniczenia zagrożeń porażeniowych. Taki sposób uziemienia znacznie tłumi przepięcia ziemnozwarciowe, co ma istotne znaczenie dla izolacji stosowanej w kablach. Dla uzyskania takiego efektu rezystancję uziemiającą należy dobrać z warunku  $R\omega C_{os} < 1$  (R- rezystancja uziemienia,  $\omega C_{os}$  – susceptancja doziemna sieci). Sieci uziemione przez rezystancję stawiają duże wymagania ochronie przeciwporażeniowej. Szczególnie wtedy, gdy w sieci pracują linie i stacje SN/nn w wykonaniu napowietrznym. Jak wykazują doświadczenia francuskie w rozległych sieciach kablowych uziemionych przez

rezystancję należy stosować również dławiki kompensujące w celu eliminowania w prądzie zwarcia z ziemią składowej pojemnościowej.

#### *Tendencje rozwoju w budowie sieci rozdzielczych.*

W sieciach 110 kV istotnym czynnikiem determinującym pewność i niezawodność dostaw energii jest kształtowanie odpowiednich struktur i układów sieciowych. Dla sieci 110 kV bardzo istotne jest zapewnienie prawidłowej liczby stacji odbiorczych 110 kV/SN (GPZ-tów), lokalizowanych na jednym ciągu liniowym pomiędzy stacjami węzłowymi zasilającymi tą sieć. W sieciach tych przybywać będzie nowych źródeł, przede wszystkim w postaci dużych farm wiatrowych. Wystąpią więc coraz częściej problemy, które będą dotyczyły regulacji napięcia oraz przepływu mocy czynnej i biernej. Należy spodziewać się włączenia w procesy regulacyjne nowoczesnych urządzeń energoelektronicznych np. typu FACTS. Nowe zadania staną również przed układami EAZ, w których częściej będą wykorzystywane kryteria odcinkowe z wymianą informacji na przeciwległych końcach linii.

W budowie linii 110 kV napowietrznych częściej będą wykorzystywane konstrukcje rurowe, izolatory kompozytowe oraz przewody wysokotemperaturowe (o niskim zwisie). Rozwój linii kablowych dotyczyć będzie przede wszystkim krótkich odcinków miejskich. Linie kablowe dłuższe niż 10-15 km wymagają stosowania urządzeń kompensujących prąd pojemnościowy. Na rozwój elementów konstrukcyjnych sieci 110 kV wpływać będą przede wszystkim nowe technologie wysokonapięciowe i inżynieria materiałowa. Należy również podkreślić pilną potrzebę dokonywania zmian prawnych w taki sposób, aby likwidować powstające na tym polu przeszkody w niezbędnej rozbudowie infrastruktury sieciowej 110 kV.

W sieciach SN należy przewidywać ciągły rozwój torów kablowych układanych w ziemi. Natomiast w sieciach napowietrznych tendencje rozwojowe należy upatrywać w nowych technologiach konstrukcji wsporczych. Dotyczy to słupów lekkich i wąskogabarytowych oraz bardzo wytrzymałych słupów wirowanych (stacja SN/nn do 1MVA instalowana na pojedynczej żerdzi). Typowe przewody gołe w linach napowietrznych będą w coraz większym stopniu zastępowane przewodami w osłonie izolacyjnej (system PAS) oraz lekkimi przewodami kablowymi typu Excel, a na trasach trudnych (np. lasy, tereny górnicze itp.) jednofazowymi kablami z linka nośną (kable typu SAXKA). W ochronie przepięciowej tradycyjne układy rozłkowe zastępowane będą nowoczesnymi ogranicznikami przepięć. Istotnym elementem wpływającym na pewność zasilania linii SN będzie skuteczność zabezpieczeń, szczególnie ziemnozwarciowych reagujących na relatywnie duże rezystancje w miejscu zakłócenia. Realizując programy sieci inteligentnych musi nastąpić nasycenie ciągów liniowych rozłącznikami. Dotyczy to również układów automatyki

sieciowej (np. czułe wskaźniki przepływu prądów zwarcia) i zdalnego sterowania. Przenoszenie układów pomiarowych i elementów EAZ w głąb sieci SN otwiera nowe możliwości w definiowaniu nowych funkcji decyzyjnych i trafnej identyfikacji zakłóceń szczególnie uciążliwych i słabo rozpoznawalnych. Jest również pilna potrzeba ciągłego udoskonalania zasad sterowania i zarządzania sieciami dystrybucyjnymi charakteryzującymi się wysokim nasyceniem jednostkami generacji rozproszonej (zagadnienia regulacji napięcia, strat mocy czy pracy źródeł w warunkach zakłóceń) oraz opracowania standardów automatyzacji sieci z uwzględnieniem systemów energoelektronicznych.

#### *Zagadnienia prawne, organizacyjne i ekonomiczne.*

Majątek sieci dystrybucyjnych jest w około 60% zdekapitalizowany. Średni wiek urządzeń wynosi około 40 lat. Znaczna część tego majątku zbliża się do granicy technicznego zużycia i wymaga modernizacji. Uwarunkowania prawne powodują, że w wielu przypadkach realizuje się inwestycje odtworzeniowe, zamiast modernizacji, utrudniona jest też realizacja remontów i zabiegów konserwacyjnych. Sieci rozdzielcze, dla zapewnienia ich prawidłowego rozwoju i eksploatacji, powinny zostać objęte systemem rozwiązań prawnych w zakresie pozyskania terenu pod realizację inwestycji i dostępu do istniejących obiektów.

Rosnąca ilość źródeł generacji rozproszonej przyłączanych do sieci dystrybucyjnych wymaga opracowania przejrzystych podstaw prawnych sterowania pracą tych źródeł (regulacja napięcia, sterowanie mocą, praca wyspowa w warunkach zakłóceń).

Ciągły wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną oraz rosnąca jej rola w życiu społecznym i gospodarce sprawiają, że zachodzi konieczność ciągłej modernizacji i rozwoju infrastruktury dystrybucyjnej. Operatorzy Systemów Dystrybucyjnych powinni więc dysponować odpowiednimi wytycznymi kształtowania i planowania rozwoju sieci. Wobec faktu, iż ostatni taki dokument został opracowany i wydany około 30 lat temu w zupełnie innych realiach technicznych i ekonomicznych zachodzi pilna potrzeba podjęcia prac badawczych w celu opracowania nowych wytycznych programowania rozwoju sieci rozdzielczych z uwzględnieniem nowoczesnych technologii oraz możliwości wynikających z nowoczesnych systemów informatycznych oraz urządzeń energoelektronicznych typu FACTS.

Wprowadzenie mechanizmów rynkowych do elektroenergetyki miało na celu sprawniejsze zarządzanie oraz przejrzyste zdefiniowanie obszarów powstawania kosztów w łańcuchu dostarczania energii elektrycznej. Znaczącym składnikiem tych kosztów są straty energii w elementach sieci. OSD opracowują i wdrażają programy



ograniczania strat energii w swoich sieciach. Kilkuletni okres wdrażania tych programów spowodował istotną poprawę w tym zakresie. Dalsze ograniczenie strat będzie wymagało coraz większych nakładów inwestycyjnych. Realizacja przedsięwzięć mających na celu ograniczanie strat powinna być każdorazowo poprzedzona rzetelną analizą techniczno-ekonomiczną. Kryterium wyboru spośród możliwych rozwiązań powinien być wskaźnik wartości zaktualizowanej netto (NPVR) informujący jaki zwrot z jednostki zainwestowanego kapitału zostanie osiągnięty w założonym okresie eksploatacji tych rozwiązań.

Należy również zwrócić uwagę na stosowane w krajowych warunkach modele wyznaczania uzasadnionego poziomu strat dla OSD. Modele statystyczne nie są w stanie w pełni uwzględnić specyfiki i złożoności występujących zjawisk m. in. ze względu na indywidualny (zdeteminowanych warunkami terenowymi) charakter struktur sieci oraz generację rozproszoną.

Należy z dużą ostrożnością podchodzić do wdrażania na masową skalę „smart meteringu”. Dotyczy to w szczególności odbiorców końcowych o bardzo małym poborze energii. Potrzebne są w tym zakresie rzetelne analizy efektywności oraz właściwa identyfikacja obszarów korzyści, które obecnie lokują się głównie po stronie dostawców liczników oraz systemów informatycznych (często są to podmioty zagraniczne).

Z punktu widzenia analiz i optymalnego zarządzania sieciami dystrybucyjnymi racjonalnym wydaje się w pierwszej kolejności wyposażenie w nowoczesne układy pomiarowe stacji transformatorowych SN/nn, a w dalszej kolejności odbiorców o dużym poborze energii.

### **2.1.6 Bezpieczeństwo elektroenergetyczne**

System elektroenergetyczny jest nazywany krwioobiegami nowoczesnego społeczeństwa. Porównanie jest trafne, gdyż – bez ciągłej dostawy energii elektrycznej – funkcjonowanie społeczeństw stałoby się niemożliwe. Bez energii elektrycznej, nie działają:

- Oświetlenie i sygnalizacja świetlna.
- Napędy, od drobnych do przemysłowych.
- Komunikacja, również uzależniona od stacji paliw ciekłych.
- Łączność wszelkiego rodzaju;
- Radio i telewizja.

- Ogrzewanie i wentylacja (brak napędów).
- Gaz (brak napędów).
- Handel (kasy fiskalne).
- Sieć informatyczna.
- Transport – porty lotnicze i morskie, dystrybutory paliwa.
- Wodociągi i kanalizacja.

Bezpieczeństwo elektroenergetyczne, zapewniające ciągłą dostawę energii, może być rozpatrywane w rozmaitych horyzontach czasowych:

- a) Bezpieczeństwo strategiczne. 10 i więcej lat.

W Polsce głównym nośnikiem pierwotnym do wytwarzania energii elektrycznej są krajowe paliwa kopalne. W bliskiej przyszłości przewiduje się znaczący udział energii jądrowej i odnawialnej, głównie wiatru. Korzystanie z paliw kopalnych prowadzi do konfliktów z tendencją do ochrony środowiska (emisja CO<sub>2</sub>), a struktura geologiczna krajowych kopalni węgla kamiennego prowadzi do braku konkurencyjności na rynku i związanych z tym niepokojów społecznych. Podobne problemy społeczne wystąpią z wprowadzeniem energii jądrowej. Wymienione problemy społeczne wynikają z niskiej świadomości społeczeństwa, dostrzegającego wyolbrzymione wady budowy nowych elektrowni, a nierozumiejącego podstawowych praw ekonomii. Znaczna część społeczeństwa i niedouczonej dziennikarzy jest przekonana w dziecinny sposób, że – przy rosnącym zapotrzebowaniu - można zapewnić dostawę energii elektrycznej bez budowy nowych elektrowni. Wymienione problemy mogą prowadzić do strajków, protestów i innych zaburzeń społecznych, zakłócających dostawę nośników pierwotnych energii lub blokujących budowę obiektów elektroenergetycznych, niezbędnych dla normalnego rozwoju Kraju.

Dodatkowym zagrożeniem może być administracyjne „regulowanie” cen energii elektrycznej przez organ państwowy - Urząd Regulacji Energetyki. Działalność URE miała za zadanie uniemożliwić ustalanie cen energii przez struktury monopolistyczne w energetyce (Sieci elektroenergetyczne, gazowe i ciepłownicze). Administracyjne działanie na rynku powoduje zawsze niebezpieczne skutki. Ustalanie zbyt niskich cen energii prowadzi do nieopłacalności inwestycji w elektrownie i sieci, co w przyszłości doprowadzi do deficytu mocy w systemie elektroenergetycznym i powrotu do „planowych wyłączeń”, znanych z okresu komunistycznego. Niebezpieczeństwo z tym związane jest duże, gdyż po pojawieniu się deficytu mocy, inwestycje przywracające stan bezpieczny trwają 6 do 10 lat!

Już on kilku lat maleje margines pomiędzy zapotrzebowaniem, a mocą dyspozycyjną, co może doprowadzić do ograniczeń poboru przez odbiorców – znanych z okresu komunizmu. Skutkiem zbyt niskich cen jest również niebezpieczne niedoinwestowanie w strukturę sieciową, którego skutki wystąpiły w najbogatszych regionach świata (Kalifornia).

b) Bezpieczeństwo długookresowe. Ca rok.

Krajowa Dyspozycja Mocy, sterująca pracą systemu elektroenergetycznego, jest zobowiązana do zapewnienia pokrycia zmieniającego się zapotrzebowania, uwzględniając pojawienie się nowych, wielkich odbiorców, wielkie imprezy itp.. Opracowuje prognozę długookresową zapotrzebowania i koordynuje terminy remontów i przeglądów w elektrowniach oraz w sieci przesyłowej. Podobne zadania w sieciach rozdzielczych realizują dyspozycje mocy tych sieci.

c) Bezpieczeństwo krótkookresowe. Do tygodnia.

Wymienione wyżej dyspozycje mocy, uwzględniając krótkoterminowe prognozy pogody (wpływającej na zapotrzebowanie, wytwarzanie – wiatr i wytwarzanie – słońce), planowane imprezy, niedyspozycyjność elementów systemu, wymianę międzynarodową, oraz przewidywane efekty działania rynku energii, planuje pracę systemu na najbliższe dni. Podobnie jak wyżej krajowe ośrodki dyspozycyjne spełniają swoje zadania oraz nie odbiegają sposobem działania i wyposażeniem od odpowiedników w rozwiniętych krajach europejskich.

d) Bezpieczeństwo bieżące (on line).

W horyzoncie czasowym – minut, godzin prawidłowa praca systemu jest zapewniona przez ww. ośrodki dyspozytorskie, spełniające zadowalająco swoje zadania. W Horyzontach czasowych – sekundowych, skutki lokalnych uszkodzeń elementów systemu są eliminowane przez elektroenergetyczną automatykę zabezpieczeniową (EAZ), do nienormalnych stanów systemu lub jego obszarów nie dopuszcza automatyka systemowa o systematycznie rozbudowywanych algorytmach działania. Aktualnie trwają prace nad automatyką systemową, opartą na pomiarze fazorów napięcia na dużych obszarach systemu elektroenergetycznego.

## **Podsumowanie.**

Bezpieczeństwo elektroenergetyczne może być zagrożone w horyzontach wieloletnich z powodu niedostatecznych inwestycji w elektrowniach i sieci.

W krótszych horyzontach postęp techniczny nie odbiega od średniego poziomu europejskiego.

## 2.1.7 Sterowanie i automatyka systemowa

*Elektroenergetyczna Automatyka zabezpieczeniowa (EAZ).*

Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa jest częścią systemów elektroenergetycznych realizującą funkcje samoczynnego zapobiegania i likwidacji zakłóceń w tych systemach. Dzieli się ona na EAZ eliminacyjną (np. zabezpieczenia  $>I$ ,  $>>I$ ,  $>U$ ,  $<U$ ,  $>f$ ,  $<f$ ,  $>\vartheta$ ), restytucyjną (np. SPZ, SZR) oraz prewencyjną (np. SCO, APKO), gdzie nazwy tych grup automatyki określają ich zastosowanie.

Ponadto układy EAZ można podzielić ze względu na obszar oddziaływania, tj. na automatykę lokalną, której zadaniem jest oddziaływanie na jeden lub kilka powiązanych z sobą elementów sieci elektroenergetycznej (np. generator, transformator, linię elektroenergetyczną, szyny) oraz na automatykę systemową, której zadaniem jest oddziaływanie na cały system elektroenergetyczny (np. SCO).

Wielkościami kryterialnymi wykorzystywanymi przez układy elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej są wielkości bezpośrednio związane z fizyką zjawisk zachodzących w systemie elektroenergetycznym, tj. przede wszystkim: prąd, napięcie, częstotliwość, prędkość kątowna i temperatura oraz ich funkcje jak np. impedancja (iloraz napięcia i prądu). Wykorzystywane są również inne miary detekcji stanu zakłóceniewego jak ilość wydzielonego gazu lub jego przepływ w zabezpieczeniach transformatorów czy błysk łuku elektrycznego w zabezpieczeniach zwiarcowych rozdzielnic.

Liczba i rodzaj układów EAZ stosowanych do zabezpieczenia elementów systemu elektroenergetycznego wynika z przepisów: głównie rozporządzenia Ministra Gospodarki oraz IRiESP i IRiESD operatorów sieci, które w istocie przenoszą wymagania zawarte w rozporządzeniu.

Rodzaj oraz liczba układów EAZ wymaganych dla ochrony danego elementu sieci zależy od rodzaju zabezpieczanego elementu, mocy znamionowej, napięcia znamionowego, lokalizacji w systemie elektroenergetycznym, konfiguracji sieci oraz istotności dla tego systemu.

Wymagania co do automatyki zabezpieczeniowej, w sensie przypisania rodzaju zabezpieczeń do elementów systemu elektroenergetycznego, nie ulegają zmianie od lat.

*Kierunki rozwoju EAZ.*

Rzwoj elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej w przyszłości nie będzie związany ze zmianą wielkości kryterialnych stosowanych przez poszczególne zabezpieczenia. Wynika to faktu, że automatyka zabezpieczeniowa już wykorzystuje

informacje związane z fizyką zjawisk w systemie i znalezienie innych jest praktycznie niemożliwe (a przynajmniej skrajnie trudne).

Rozwój ten będzie przebiegał w sposób różny dla systemu przesyłowego i systemów dystrybucyjnych a będzie bezpośrednio wynikał z różnicy stanu początkowego oraz będzie związany ze zmianą funkcjonowania tych systemów. W jednym i drugim przypadku będzie jednak związany z rozwojem systemów komunikacji.

W przypadku *systemu przesyłowego* elementem nowym będą systemy oparte o pomiar fazorów napięć i prądów w węzłach i elementach systemu elektroenergetycznego, tzw. WAMS (Wide Area Measurement Systems). W wielu systemach systemy WAMS są już zainstalowane i rozbudowywane. W chwili obecnej informacja zbierana przez systemy WAMS wykorzystywana jest głównie do analiz *post mortem*, tj. analiz po awarii. Wyzwaniem dla systemów elektroenergetycznych są natomiast systemy zabezpieczeń (Wide Area Protection Systems) i regulacji (Wide Area Control Systems) wykorzystujące informacje globalne o systemie.

Rozwój systemów teleinformatycznych będzie prowadził do rozwoju automatyki zabezpieczeniowej o charakterze ogólnosystemowym. Automatyka tego typu będzie wykorzystywała łączniki, jak automatyka SCO w chwili obecnej, ale również będzie mogła oddziaływać na źródła energii (przyłączone do sieci poprzez przekształtniki energoelektroniczne) oraz ewentualnie na odbiory.

Należy się również spodziewać integracji funkcji zabezpieczeniowych i tym samym zmiany struktury EAZ w stacjach elektroenergetycznych. W skrajnych przypadkach może to prowadzić do eliminacji zabezpieczeń dedykowanych poszczególnym pojedynczym obiektom (lub realizujących pojedyncze funkcje zabezpieczeniowe) przez jeden zredundowany centralny system komputerowy (sterownik). W formie pośredniej rozwój zabezpieczeń będzie odbywał się w kierunku zabezpieczeń o strukturze hierarchicznej, gdzie na poziomie podstawowym (obiekcie) realizowane będą proste funkcje zabezpieczeniowe a wyżej funkcje związane ze skoordynowanym oddziaływaniem na obiekt składający się z wielu elementów np. na stację elektroenergetyczną.

Wraz z rozwojem hierarchicznych struktur EAZ spodziewać się należy rozwoju automatyki o charakterze adaptacyjnym, tj. dostosowywania się nastaw zabezpieczeń do zmieniającej się struktury sieci oraz ewentualnie do zmieniającego się jej stanu pracy. Nie można również wykluczyć rozwoju EAZ adaptacyjnych lokalnych.

W przypadku *systemów dystrybucyjnych* rozwój EAZ będzie przebiegał w sposób zbliżony do występującego w systemach przesyłowych. Zatem z jednej strony

następowało będzie nasycanie sieci klasycznymi układami zabezpieczeń (realizującymi funkcje i mające struktury znane z systemu przesyłowego) a z drugiej strony, jako wynik rozwoju infrastruktury teleinformatycznej wprowadzane będą funkcje zabezpieczeń, sterowania i regulacji o charakterze globalnym. Charakter globalny należy rozumieć tu jako odnoszący się do pewnego fragmentu systemu elektroenergetycznego.

#### *Automatyka regulacyjna lokalna.*

Automatyka regulacyjna lokalna bazuje na informacjach pozyskiwanych lokalnie, tj. z szyn, zacisków, wałów, uzwojeń, obudów, wnętrza lub bezpośredniego otoczenia urządzeń podlegających sterowaniu oraz rozdzielnic do których są one przyłączone. Elementami tej automatyki są układy regulacji: kotłów (i innych wytwornic pary), turbin, generatorów synchronicznych, napędów, odbiorów z przetwornikami elektro-mechanicznymi, transformatorów, kompensatorów (w tym energoelektronicznych), linii HVDC, itp. Różnorodność obiektów tworzących system elektroenergetyczny, tj. od źródeł wytwórczych, poprzez systemy przesyłu, do odbiorów energii elektrycznej determinuje różnorodność występujących układów regulacji i tym samym różnorodność występujących w systemach elektroenergetycznych regulatorów. Regulator rozumiany jest tu jako element układu regulacji, w skład którego wchodzi obiekt podlegający sterowaniu (regulacji), regulator oraz przetworniki pomiarowe.

Ogromna różnorodność regulatorów uniemożliwia dogłębne odniesienie się do nich w krótkim tekście. Tym niemniej można stwierdzić, że współczesne regulatory, pracujące w układach regulacji elementów systemów elektroenergetycznych są układami cyfrowymi, budowanymi w oparciu o technikę mikroprocesorową. Regulatory analogowe stanowią odchodzącą w przeszłość pozostałość.

Regulatory współczesne to w znakomitej większości układy stacjonarne, liniowe, tj. opisane za pomocą układu równań różnicowych (dyskretnego odpowiednika równań różniczkowych) o niezmiennych w czasie wartościach współczynników. Algorytmy regulacji stosowane w tych regulatorach dość często wywodzą się z algorytmów analogowych (sprawdzonych w przeszłości), które transponowane są na układy dyskretnie. W znakomitej większości przypadków stosowane są regulatory typu PID a w przypadku regulatorów generatorów synchronicznych regulatory o prostych transmitancjach zdefiniowanych np. przez normę IEEE Std 421. Istotnym elementem regulatorów są ograniczniki dopuszczalnych stanów pracy obiektu.

Stosowane są również inne rodzaje regulatorów jak np. regulatory predykcyjne (Model Predictive Control), regulatory odporne (krzepkie) (Robust Control), regulatory rozmyte (Fuzzy Control), regulatory neuronowe (Artificial Neural Network Control)

oraz regulatory adaptacyjne (Adaptive Control). Regulatory tego typu ze względu na pewne swoje cechy, pewien konserwatyzm potencjalnych użytkowników oraz pewną nowość są stosowane znacznie rzadziej, a regulatory adaptacyjne nawet skrajnie rzadko. Przykładowo, w układach regulacji generatorów synchronicznych, zastosowanie znalazło dotychczas tylko kilkanaście stabilizatorów systemowych adaptacyjnych.

Współczesne regulatory dość często budowane są jako układy redundantne oraz wyposażane są w coraz bardziej rozbudowane systemy autodiagnostyki. Ma to na celu zwiększenie ich odporności na uszkodzenia wewnętrzne i tym samym zwiększenie niezawodności pracy obiektów podlegających regulacji.

Typowymi funkcjami wielu współczesnych regulatorów jest zdolność komunikacji z systemami zewnętrznymi oraz możliwość rejestracji zdarzeń. W części z nich wbudowane są generatory funkcji testowych wykorzystywanych w procesie uruchamiania danego układu regulacji.

#### *Kierunki rozwoju automatyki regulacyjnej lokalnej.*

Rozwój automatyki regulacyjnej lokalnej będzie zmierzał w kierunku zwiększenia niezawodności pracy układu regulacji poprzez:

- Rozwój funkcji autodiagnostyki w regulatorze.
- Rozproszenie funkcji regulacyjnych na pewną liczbę obiektów (regulatorów) uczestniczących w procesie regulacji w hierarchicznej strukturze układu regulacji. Rozumieć to należy np. jako możliwość przejęcia funkcji regulacji przez regulator nadrzędny (np. regulator stacji elektroenergetycznej), tj. wyższego poziomu, w przypadku zidentyfikowania nieprawidłowego działania regulatora na poziomie niższym.
- Stosowanie nowych algorytmów regulacji np. wymienionych powyżej regulatorów krzepkich, predykcyjnych lub adaptacyjnych. Adaptacyjność regulatorów może być uzyskiwana w wyniku stosowania klasycznych (znanych) algorytmów adaptacyjnych lub wypracowywana przez układy nadrzędne. W tym drugim przypadku regulator podstawowy byłby regulatorem nieadaptacyjnym natomiast wartości jego parametrów lub struktura (algorytm) byłyby przesyłane z nadrzędnego układu regulacji (w tym np. z poziomu automatyki regulacyjnej systemowej) jako efekt zmiany potrzeb regulacyjnych.
- Uwzględnieniu sygnałów o charakterze globalnym, tj. pochodzących z odległych węzłów systemu elektroenergetycznego. Przykładem mogą być

tu przyszłe stabilizatory systemowe wykorzystujące informacje pochodzące z bloków wytwórczych innych elektrowni lub wspomnianych innych węzłów sieci elektroenergetycznych.

Podsumowując powyższe można stwierdzić, że należy się spodziewać swego rodzaju „globalizacji” pewnych procesów regulacyjnych lub wybranych funkcji regulacyjnych.

#### *Automatyka regulacyjna systemowa.*

Automatyka regulacyjna systemowa bazuje na informacjach pozyskiwanych lokalnie, tj. z węzła systemu elektroenergetycznego w którym jest zainstalowana lub na informacjach pozyskiwanych globalnie tj. z innych węzłów systemu. W tej grupie automatyki można wskazać: układy regulacji nadrzędnej węzłów wytwórczych (ARNE), układy regulacji grupowej węzłów transformatorowych (ARST) oraz układ regulacji częstotliwości i mocy wymiany międzysystemowej (ARCM). Nazwy ARNE i ARST są nazwami produktów ale w systemie krajowym przyjęto je jako nazwy typu automatyki.

Ze względu na lokalny, w sensie zasięgu oddziaływania, charakter regulacji napięć i mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych układy ARNE i ARST instalowane są jako niezależne. Ale w przypadku węzłów ulokowanych blisko siebie – w sensie elektrycznym – układy ARNE (lub ARST) tych węzłów wiąże się z sobą informacyjnie lub stosuje się jeden układ realizujący zadania regulacyjne zdefiniowane dla obydwu węzłów.

Ze względu na różnorodność konfiguracji stacji elektroenergetycznych oraz ewentualnie różne zadania regulacyjne, algorytmy poszczególnych układów ARNE i ARST są różne, tj. są indywidualnie dostosowane do lokalizacji i funkcji stacji w systemie elektroenergetycznym.

Z kolei proces regulacji częstotliwości i mocy wymiany międzynarodowej (międzysystemowej) w systemie elektroenergetycznym ma charakter globalny, co oznacza, że zmiana mocy generowanej w dowolnym miejscu systemu przekłada się na zmianę częstotliwości w całym systemie. Mowa o stanie ustalonym. Regulacja realizowana jest tu trójpoziomowo.

Ze względu na globalny charakter procesu, regulacja częstotliwości w systemie elektroenergetycznym realizowana jest z wykorzystaniem pojedynczego regulatora centralnego, chociaż we współpracy z regulatorami turbin. W tzw. regulacji pierwotnej uczestniczą tylko wybrane zespoły wytwórcze. Efektem działania tych układów regulacji jest podążanie wartości mocy wytwarzanej przez zespół wytwórczy za zmianami mocy obciążenia w systemie (i tym samym za zmianami częstotliwości)



zgodnie z charakterystyką układu regulacji turbiny, zdefiniowanej przez statyzm. W konsekwencji działania układów regulacji pierwotnej, ze względu na niezerową wartość statyzmu regulatorów turbin, w stanie ustalonym uchyb częstotliwości pozostaje niezerowy.

Za sprowadzenie uchybu częstotliwości do zera odpowiada regulator centralny (ARCM), realizujący tzw. regulację wtórną. Regulator ten w oparciu o pomiar częstotliwości oraz ewentualnie pomiar mocy czynnej na liniach trans-systemowych generuje sygnały zmiany mocy zadanej dla regulatorów wybranych zespołów wytwórczych, tj. tych które uczestniczą w regulacji wtórnej.

Trzecim etapem regulacji jest tzw. regulacja trójna, w ramach której określa się, dla stanu ustalonego, wartości zadane mocy czynnej dla wszystkich tzw. centralnie dysponowanych jednostek wytwórczych. Wartości zadane mocy czynnej wynikają z zawartych umów dotyczących wytwarzania energii elektrycznej, przy spełnieniu wymagań technicznych dla elementów sieci elektroenergetycznej, tj. braku przeciążeń, zachowaniu odpowiednich poziomów napięć, itd.

Tempo realizowanych procesów regulacyjnych dopasowane jest tu do wymagań systemu elektroenergetycznego jako całości, cech elementów systemu elektroenergetycznego, czasu działania automatyki regulacyjnej lokalnej oraz wymagań odbiorców energii. Obowiązuje tu zasada, że czas reakcji danego układu regulacji jest tym wolniejszy im wyżej w hierarchicznej strukturze dany układ regulacji funkcjonuje.

#### *Kierunki rozwoju automatyki regulacyjnej systemowej.*

Rozwój automatyki regulacyjnej systemowej będzie zmierzał w kierunku integracji z systemami WAMS. Integracja tej automatyki z systemami WAMS i dalej z automatyką regulacyjną lokalną będzie oznaczała możliwość skoordynowania działania znaczącej liczby układów regulacji na wszystkich jej poziomach.

W przypadku układów regulacji napięcia i mocy biernej należy spodziewać się pojawienia się trzeciego poziomu regulacji automatycznej (obecnie realizują to operatorzy systemów w otwartej pętli). Obecnie funkcjonujące układy ARNE i ARST pozostaną jako lokalne układy regulacji ale ich algorytmy działania, wartości parametrów oraz realizowane funkcje regulacyjne będą modyfikowane przez wspomnianą automatykę regulacyjną nadrzędną.

W przypadku układów regulacji częstotliwości i mocy wymiany ARCM nie należy spodziewać się zmian w zakresie realizowanych funkcji i podstawowych algorytmów.

W przypadku automatyki regulacyjnej systemowej zmiany będą dotyczyły sposobów przesyłu informacji, czasu jej przesyłu oraz ilości przesyłanej i przetwarzanej informacji (systemy WAMS generują dużą ilość informacji).

Skrócenie czasu przesyłu informacji będzie miało szczególne znaczenie dla stabilności systemów elektroenergetycznych. Umożliwi to opracowanie i wdrożenie nowych, efektywnych algorytmów obrony systemu przed utratą stabilności napięciowej, lokalnej i globalnej.

Powyższe funkcje, nomenklaturowo związane z funkcjami zabezpieczeniowymi, są również regulacyjnymi. Jako funkcje obronne i zarazem regulacyjne wykorzystywane będą w procesach regulacyjnych związanych z podziałem systemu na części, pracą niesynchroniczną wydzielonych podsystemów oraz z doprowadzeniem do ich resynchronizacji.

### **2.1.8. Sieci inteligentne – „ Smart grids”**

Istniejące sieci elektroenergetyczne dzielą się na sieci przesyłowe i rozdzielcze. Sieci przesyłowe pracują jako zamknięte. Węzły tych sieci są w pełni opomiarowane a informacja o stanie ich pracy (pomiarzy z węzłów) przesyłane są do systemu informatycznego operatora sieci przesyłowej, gdzie wykorzystywane są do bieżącego prowadzenia ruchu, w procesach regulacyjnych, w procesach planowania pracy systemu, w analizach zdarzeń minionych oraz do szkolenia operatorów.

Operator systemu przesyłowego na drodze automatycznej i zdalnej steruje pracą systemu elektroenergetycznego, a w tym uczestniczy bezpośrednio w procesie regulacji częstotliwości i mocy wymiany międzysystemowej (sterowanie mocą zadaną bloków wytwórczych w ramach regulacji wtórnej i trójnej), w procesie sterowania rozptywem mocy, a pośrednio w procesach regulacji napięć i mocy biernej, poprzez zadawanie wartości poziomów napięć lub przepływu mocy biernej dla układów nadrzędnej regulacji napięcia ARNE lub ARST.

Procesy regulacyjne realizowane są również na drodze automatycznej przez lokalne układy regulacji jak wspomniane już regulatory ARNE, ARST, regulatory generatorów i kompensatorów różnego typu oraz regulatory turbin (w ramach regulacji pierwotnej).

Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa dostosowana jest do struktury i stanów pracy sieci przesyłowej co oznacza odpowiednią lokalizację, redundancję i rezerwowanie zabezpieczeń.

Systemy sterowania, systemy przesyłu informacji, systemy przetwarzania informacji oraz automatyka zabezpieczeniowa w sieciach przesyłowych są oparte o najnowsze technologie.

W odróżnieniu od sieci przesyłowych sieci rozdzielcze są tym gorzej wyposażone w systemy sterowania im niższym poziomem napięcia się charakteryzują. Szczególnie ubogie w systemy sterowania (w tym monitorowania stanu pracy) są sieci średniego i niskiego napięcia.

W przeszłości stan ten nie utrudniał prawidłowej pracy tych sieci ponieważ pracowały one (i pracują obecnie) jako promieniowe, w znakomitej większości, bez źródeł energii przyłączonych do tych gałęzi oraz ponieważ były zazwyczaj przewymiarowane w stosunku do zmienności stanu pracy odbiorów i tych nielicznych źródeł energii. Oznacza to, że bez względu na stan pracy źródeł i odbiorów nie dochodziło w tych sieciach do przeciążeń ich elementów ani do nadmiernego odchylenia poziomów napięć.

Automatyka zabezpieczeniowa była (i jest) dostosowana do jednokierunkowego przepływu mocy.

Dla operatorów sieci dystrybucyjnych stan taki był wygodny, ponieważ nie musieli oni aktywnie uczestniczyć w procesach regulacyjnych w tych sieciach (włączając w to monitorowanie stanu pracy) i tym samym ponosić kosztów z tymi procesami związanych. Należy tu jednak zaznaczyć, że możliwości technologiczne pełnego monitorowania i sterowania w tych sieciach w przeszłości były skrajnie ograniczone.

W chwili obecnej systemy elektroenergetyczne ulegają szybkim zmianom. Elektrownie wiatrowe, słoneczne i wodne (przepływowe – znane od lat oraz pływowe, wykorzystujące falowanie wody, itp.) są materializującym się marzeniem człowieka o dostępie do niewyczerpalnego, tj. odnawialnego, źródła energii. Źródłem energii jest tu słońce i ruch obrotowy Ziemi, a odnawialność rozumiana jest tu w krótkim okresie czasu.

Szybki rozwój elektroenergetyki w zakresie powyższych źródeł energii (pomijając klasyczne elektrownie wodne) rozpoczął się w ostatnim stuleciu XX wieku, gdy rozwój technologiczny osiągnął odpowiedni poziom, informacje o zasobach kopalnych źródeł energii (węgiel, ropa naftowa, gaz) wskazywały, że wyczerpią się one w ciągu kilkudziesięciu lat a ich ceny gwałtownie rosły. Na szczęście prognozowana chwila, w której paliwa te się wyczerpią oddala się, co wynika z faktu odkrywania nowych złóż oraz przekraczania progu opłacalności wydobywania złóż wcześniej znanych. W tym mieści się budzący ostatnio emocje gaz łupkowy. Nie oznacza to jednak, że problem wyczerpywania się kopalnych nośników energii, nie

występuje. Wręcz przeciwnie, i dlatego pozyskiwanie energii tylko ze źródeł energii odnawialnej jest w dalszej przyszłości nieuniknione.

Powyższe, nowe źródła energii, o stosunkowo małych mocach jednostkowych, są często przyłączane do sieci rozdzielczych, a ze względu na swoje właściwości, wymuszają zmianę sposobu funkcjonowania tych sieci, a w tym wymuszają ich zmiany strukturalne. Zmiany te prowadzą w kierunku tzw. sieci inteligentnych (ang. smart grids).

Sieci inteligentne, „w najbardziej potocznym rozumieniu tego terminu to sieci zapewniające dostarczanie odbiorcom energii elektrycznej lub szerzej - usług energetycznych - z wykorzystaniem środków IT, zapewniające obniżenie kosztów i zwiększenie efektywności oraz zintegrowanie rozproszonych źródeł energii, także odnawialnej”. Inna definicja określa sieć inteligentne jako „sieci dystrybucyjne i powiązane z nią technologie informatyczno-telekomunikacyjne integrujące w sposób inteligentny w działania uczestników procesów wytwarzania, przesyłu, dystrybucji i użytkowania energii elektrycznej w celu poprawy niezawodności dostaw i efektywności OSD oraz aktywnego angażowania odbiorców w podnoszenie efektywności energetycznej. Definicje te określają cel, który może być osiągnięty w sferze technicznej i ekonomicznej. W zakresie efektywności ekonomicznej osiągnięcie celu będzie niewątpliwie trudniejsze ze względu na koszt infrastruktury w jaką należy doposażyć istniejące sieci rozdzielacze.

W sferze funkcjonalnej sieci inteligentne powinny się charakteryzować: rozwiązaniami cyfrowymi, komunikacją dwukierunkową, zdolnością obsługi dwukierunkowej, pełnym opomiarowaniem, automatycznym lub komputerowo wspomaganym przywracaniem zasilania, zabezpieczeniami dostosowanymi do dwukierunkowego przesyłu energii (w tym adaptacyjnymi), możliwością pracy wyspowej, zdalnym testowaniem urządzeń, systemami wspomaganiami decyzji operatorskich (SCADA na poziomie sieci średniego i ewentualnie niskiego napięcia), sterowaniem na wszystkich poziomach napięć oraz możliwością oddziaływania na odbiorców.

Porównując powyższe z funkcjonalnością współczesnych sieci przesyłowych praktycznie nie widać różnicy. Różnica funkcjonalna związana jest jedynie z możliwością oddziaływania na odbiorców energii (ewentualnie prosumentami). Oznacza to, co jest w pełni zrozumiałe, że sieci inteligentne stanowią naturalny element rozwoju sieci elektroenergetycznych, polegający na przeniesieniu rozwiązań stosowanych w sieciach przesyłowych do sieci rozdzielczych.

Elementem nowym będzie tu skala rozwoju systemów informatycznych i sterowania. Liczba obiektów z którymi będą komunikowały się systemy

informatyczne (w tym systemy sterowania) będzie porównywalna z liczbą odbiorców energii, tj. kilkanaście milionów w KSE. Dla porównania liczba obiektów z którymi powiązane są współczesne systemy sterowania w systemie przesyłowym to kilkaset (bloki elektrowni i stacje transformatorowe).

Wbrew pozorom przeniesienie funkcjonalności sieci przesyłowych na sieci rozdzielcze nie jest wcale zadaniem prostym. Do problemów/zagadnień które czekają na rozwiązanie należą:

- Infrastruktura sieci inteligentnych: źródła, inteligentne liczniki energii, źródła energii odnawialnej, systemy komunikacji, zasobniki energii, elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa.
- Sterowanie elementami składowymi sieci inteligentnych, tj. źródłami, siecią elektroenergetyczną, odbiorami i zasobnikami energii.
- Konwersja sieci elektroenergetycznych w sieci inteligentne.
- Integracja sieci inteligentnych z elektroenergetyką wielkoskalową.
- Efektywność ekonomiczna sieci inteligentnych i ich elementów składowych.
- Bezpieczeństwo elektroenergetyczne sieci inteligentnych.

W pierwszym okresie rozwoju sieci rozdzielczych, bez względu na to czy sieci te będą określane inteligentnymi czy też nie, należy spodziewać się:

- Rozwoju infrastruktury informatycznej związanej z komunikacją z licznikami energii (tzw. inteligentnymi) oraz nasycenia sieci tymi licznikami. Dotyczy to sieci nn i SN.
- Wymiany łączników w sieciach SN na łączniki sterowane zdalnie oraz rozwój systemów komunikacji z tymi łącznikami.
- Rozwój systemów rekonfiguracji pracy sieci SN w stanach awaryjnych z automatyczną eliminacją uszkodzonych fragmentów sieci.
- Rozwój systemów zabezpieczeń źródeł energii przyłączanych do sieci SN oraz sieci przylegającej do punktu przyłączenia źródła.
- Rozwój systemów typu SCADA dla sieci SN, realizujących funkcje ochronne elementów sieci oraz funkcje optymalizacyjne.

W dalszym etapie rozwoju sieci, działań podobnych jak w powyższych punktach od 2 do 5, należy się spodziewać dla sieci niskiego napięcia, a szczególnie fragmentów sieci nasyconych źródłami energii.

## 2.1.9. Zadania nauki krajowej

Identyfikacja zadań nauki krajowej w zakresie rozwoju KSE wymaga pewnego zawężenia tematyki systemowej do potrzeb krajowych, chociaż takie podejście może być realizowane jedynie w ograniczonym stopniu.

Wynika to zarówno z rosnącej stopniowo skali powiązań KSE z systemami państw europejskich (nie tylko ENTSOE), rozwoju systemów elektroenergetycznych AC i DC na świecie, a także coraz silniejszych powiązań polskich instytucji naukowych z podmiotami zagranicznymi, dla których realizują one badania (niekoniecznie na potrzeby KSE).

Kolejne zawężenie tematyki zadań nauki krajowej wynika z rozróżnienia problematyki funkcjonowania i rozwoju systemu energetycznego jako pewnej zintegrowanej struktury od potrzeb badawczych i rozwojowych w zakresie elementów systemu, z których zbudowane są sieci elektroenergetyczne.

Należy zwrócić uwagę, że ta ostatnia dziedzina badań jest intensywnie rozwijana od szeregu lat, w związku ze wzrostem napięć przesyłowych AC i DC w systemach elektroenergetycznych na świecie.

Wreszcie kolejnym ograniczeniem branym tutaj pod rozwagę jest horyzont czasowy realizacji badań naukowych. Przyjęto dalej, że nie będzie on przekraczał roku 2025, a więc przypuszczalnego terminu zaistnienia elektrowni jądrowej w KSE.

Poniżej wymieniono i krótko scharakteryzowano zadania naukowe i rozwojowe, które wydają się najistotniejsze z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego kraju:

- Planowanie rozwoju systemu elektroenergetycznego w warunkach rynkowych, w aspekcie problemów z budową nowych źródeł energii elektrycznej w KSE.
- Rozwój podejścia scenariuszowego, zaawansowanych metod analizy ryzyka i analizy rozwiązań stosowanych w energetykach zagranicznych (kontrakty różnicowe w Anglii).
- Prognozowanie rozwoju energetyki prosumenckiej w skali lokalnej i w skali krajowej w celu określenia realnych możliwości udziału tej energetyki w pokryciu zapotrzebowania na moc w KSE, w przyjętym horyzoncie czasowym.

- Uwzględnienie prac badawczych i rozwojowych nad źródłami CHP w skali mikro i większej. Zwłaszcza źródeł wielopaliwowych (poligeneracja). Elektrownie wirtualne. Współpraca z systemem w stanach awaryjnych.
- Prognozowanie rozwoju sieci „smart grid” na różnych poziomach napięć sieci elektroenergetycznych, w powiązaniu z rozwojem energetyki prosumenckiej.
- Opracowanie algorytmów i struktur systemów informatycznych oraz automatyki i zabezpieczeń do sterowania sieciami „smart grid” w zależności od ich struktury.
- Magazynowanie energii elektrycznej dla pokrycia potrzeb KSE z wykorzystaniem generacji rozproszonej, samochodów elektrycznych i hybrydowych oraz wykorzystaniem sieci gazowniczej.
- Kształcenie kadr do prac w energetyce jądrowej. Zbudowanie laboratoriów do badania i rozwoju systemów automatyki i zabezpieczeń elektrowni jądrowych.
- Przystawanie wiedzy z zakresu energetyki jądrowej i tworzenie własnych zespołów naukowych w tym obszarze.

Przy obecnym systemie finansowania nauki nie ma wyraźnych priorytetów, wynikających z potrzeb rozwojowych energetyki i przemysłu, w zakresie formułowania zadań dla nauki krajowej. Dotyczy to również zakresu zagadnień naukowych związanych z rozwojem KSE.

Często prace naukowe realizowane w ramach projektów krajowych lub zagranicznych nie są związane z tymi potrzebami, a raczej wynikają z zainteresowań naukowych osób realizujących projekty. Wyniki tych prac są rzadko wprowadzane do praktyki i często służą do powiększenia jedynie dorobku naukowego pracowników realizujących projekty (t. zw. zbieranie punktów).

Trudno oczekiwać, że zadania dla nauki w zakresie energetyki czy zwłaszcza rozwoju KSE będą formułowane na poziomie NCBiRu. Wydaje się, że zadanie to powinno należeć do Ministra Gospodarki, odpowiedzialnego za bezpieczeństwo energetyczne Polski, przy współpracy z firmami elektroenergetycznymi. W tym celu Ministerstwo Gospodarki powinno dysponować pulą środków finansowych, w ramach których zlecałoby określone zadania badawcze i naukowe uczelniom i instytutom badawczym. Te zadania byłyby wynikiem potrzeb istniejących realnie w energetyce.

Prace naukowe na rzecz rozwoju KSE w uczelniach i instytutach badawczych.

Działalność naukowa w dziedzinie systemów elektroenergetycznych była intensywnie prowadzona w wielu uczelniach i instytutach branżowych, co wynikało z budowy (praktycznie od podstaw) i rozbudowy KSE w latach 1950 -1980. W późniejszym okresie, zwłaszcza w latach 90-tych i na początku bieżącego stulecia, uwaga ośrodków naukowych była skoncentrowana na zagadnieniach współpracy synchronicznej systemów UCTE i przyłączenia KSE do tych systemów. Osobną grupę zagadnień stanowiło wprowadzenie rynku energii w Polsce.

Obecnie wiele instytucji naukowych jest zaangażowanych w prace rozwojowe związane z rozbudową i modernizacją sieci elektroenergetycznej 400kV, sieci dystrybucyjnych oraz współpracę generacji rozproszonej z KSE.

Jednocześnie prawie we wszystkich uczelniach technicznych, gdzie istnieją wydziały elektryczne lub energetyczne, są prowadzone prace naukowe, które często mają pośredni związek z rozwojem KSE. Chodzi tutaj o badania elementów sieci elektroenergetycznych, takich jak transformatory, przewody do linii elektroenergetycznych, izolacja główna linii i stacji, obwody wtórne czy automatyka i zabezpieczenia.

Jednak prace związane bezpośrednio z funkcjonowaniem systemu jako integralnej struktury, takie jak modelowanie rozplływów mocy, analizy stabilności systemu w warunkach zakłóceń, regulacja mocy i częstotliwości w warunkach rynkowych, analiza stanów awaryjnych i scenariusze odbudowy systemu, były i są prowadzone tylko w niektórych uczelniach i instytutach badawczych.

Gdy chodzi o uczelnie, są to przede wszystkim Politechnika Gdańska, Politechnika Wroclawska, Politechnika Warszawska, a także AGH, Politechnika Łódzka i Politechnika Śląska.

Gdy chodzi o instytuty badawcze, to jest to przede wszystkim Instytut Energetyki, zwłaszcza Oddział Gdańsk tego Instytutu oraz Instytut Automatyki Systemów Energetycznych (IASE) we Wrocławiu.

Wymienione instytucje naukowe, zwłaszcza uczelnie, prowadzą badania, których zasięg jest znacznie szerszy niż wynikający z potrzeb KSE. Dotyczy to tematyki związanej z systemami DC, urządzeniami FACTS i innej, co należy ocenić pozytywnie w aspekcie utrzymywania w tym zakresie kontaktu z nauką światową. Natomiast wymienione tutaj instytuty badawcze, z uwagi na sposób ich finansowania, realizują przede wszystkim zadania zlecane przez PSE S.A., spółki dystrybucyjne i elektrownie w celu rozwiązania konkretnych problemów praktycznych i uzyskania w tych firmach określonych korzyści.



Na stronach internetowych wymienionych uczelni i instytutów badawczych można znaleźć szeroki zakres tematyki, którą, w zakresie zagadnień systemowych, zajmują się zespoły badawcze w tych instytucjach.

Należy zaznaczyć, że wszystkie wymienione uczelnie prowadzą specjalności związane z sieciami elektroenergetycznymi, kształcąc w tym kierunku kadry dla polskiej elektroenergetyki.

Mankamentem segmentu nauk technicznych (nie tylko w obszarze zagadnień systemowych) jest słaby związek z praktyką przemysłową. Wydaje się, że nic tutaj nie pomogą kolejne „reformy” ogłaszane co pewien czas przez zmieniające się ekipy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Problemu tego nie da się rozwiązać na drodze administracyjnej za pomocą kolejnych ustaw lub rozporządzeń. Bardzo trudne jest uzdrowienie sytuacji przez kogoś kto nigdy sam z przemysłem nie współpracował, niczego nie wdrożył a nośne słowo „innovacja” zna przede wszystkim z prasy i szumu medialnego czynionego od pewnego czasu wokół tej sprawy.

Stopniową poprawę w tym zakresie można by uzyskać zmieniając model karier naukowych w instytucjach rozwijających nauki techniczne w Polsce. Przebieg kariery „od dyplomu studiów do emerytury” w jednej uczelni ogranicza możliwości zdobycia doświadczeń praktycznych i kontaktów w przemyśle. Można by w tym zakresie wykorzystać doświadczenia niemieckie, gdzie po uzyskaniu doktoratu pracownik musi opuścić uczelnię i dopiero po zdobyciu doświadczenia praktycznego może ubiegać się o etat na uczelni.

### *Literatura*

[1] Wykorzystano referat Prof. Jana Popczyka, wygłoszony na posiedzeniu Sekcji Systemów Elektroenergetycznych Komitetu Elektrotechniki PAN i wyniki dyskusji nad tym referatem

## **2.2 Wielkie Moce i Wysokie Napięcia**

*Redakcja: naukowa: prof. dr hab. inż. Romuald Włodek, AGH, Kraków*  
*Autorzy:*

*dr inż. Jerzy Bielecki, Instytut Energetyki Warszawa,*  
*prof. dr hab. inż. Barbara Florkowska, AGH Kraków,*  
*dr hab. inż. Marek Florkowski, ABB Polska,*  
*dr hab. inż. Jakub Furgał, prof. AGH, AGH Kraków,*  
*prof. dr inż. Stanisław Gubański, Chalmers Univ.,*  
*prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska, Politechnika Poznańska,*  
*mgr inż. Dariusz Lubera, TAURON Polska,*  
*dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRZ, Politechnika Rzeszowska,*  
*mgr inż. Stanisław Onak, ZAPEL Boguchwała,*  
*dr hab. inż. Piotr Borkowski, prof. PŁ, Politechnika Łódzka,*  
*prof. dr hab. inż. Jerzy Skubis, Politechnika Opolska,*  
*prof. dr hab. inż. Jacek Wańkowicz, Instytut Energetyki Warszawa,*  
*prof. dr hab. inż. Romuald Włodek, Politechnika Rzeszowska,*  
*dr hab. inż. Paweł Zydróż, AGH Kraków.*

Wstęp.

Temat wiodący Mapa rozwoju dyscypliny „elektrotechnika” obejmuje:

- podstawy teoretyczne dyscypliny „elektrotechnika” służące zagadnieniom technologicznym i systemowym, wynikającym z trendów i potrzeb aplikacji tej dyscypliny w różnych dziedzinach techniki i życia społecznego,
- rekomendacje i strategie badawcze oraz edukacyjne w dziedzinie elektrotechniki,

oraz wskazuje przewidywane kierunki rozwoju tej dyscypliny i wynikające stąd racjonalne programy badań.

W ramach tak przyjętych założeń tematu wiodącego jest opracowany tekst tematu szczegółowego dotyczącego wkładu ze strony Sekcji Wielkich Mocy i Wysokich Napięć.

Temat szczegółowy.

Perspektywy rozwoju dyscypliny „Elektrotechnika” są związane z technologiami w zakresie wytwarzania, przesyłu, rozdziału i wykorzystania energii elektrycznej. Obecny zakres „Elektrotechniki” wskazuje na jej multi- i interdyscyplinarny charakter, wymagający współdziałania wielu dziedzin. Jako przykłady można wymienić: systemy elektroenergetyczne, aparaty elektryczne wysokiego napięcia, maszyny i napędy elektryczne, energoelektronika, informatyka, elektronika i mikroelektronika, optoelektronika, technologie materiałowe, telekomunikacja, systemy mobilne i wbudowane.

W ostatniej dekadzie powstały nowe kierunki o zasadniczym znaczeniu dla rozwoju elektroenergetyki i mających merytoryczne związki z problematyką wysokich napięć. Należą tu między innymi prace związane z wdrażaniem koncepcji SmartGrid na wszystkich poziomach napięć (nn-SN-WN), nowe generacje układów automatyki zabezpieczeniowej, pozwalające na tworzenie efektywnych systemów kontroli rozległych systemów (WAMS), rozwiązania energooszczędne (np. Smart Building), eMobility - samochody elektryczne- oraz infrastruktura szybkiego ładowania, wymagająca zapewnienia zasilania w sieciach elektroenergetycznych, układy generacji rozproszonej oraz ich integracja i ich współpraca z systemem elektroenergetycznym,

Do kierunków rozwijanych w elektroenergetyce i mających bezpośredni związek z problematyką wysokich napięć należą: przesył energii prądem stałym, wyposażenie systemu elektroenergetycznego w nowoczesne urządzenia i aparaty o wymaganej niezawodności, zwiększenie przepustowości i zapewnienie stabilności sieci poprzez instalacje FACTS i inne.

Szczególnie ważnym tematem jest prognoza przyszłych technik przesyłu energii elektrycznej, do których należą kanały przesyłu GW, przesył niskoemisyjny, przejście w terenach wysoko zurbanizowanych z linii napowietrznych na linie kablowe, w szerszym ujęciu wzrost udziału linii kablowych w sieciach elektroenergetycznych oraz służące tym celom nowe technologie kablowe. Pojawia się przy tym potrzeba innych, przyszłościowych metod alternatywnego przesyłu energii elektrycznej.

Naturalnymi tematami w zakresie elektrotechniki, mającymi obecnie duże znaczenie aplikacyjne, jest na przykład penetracja energoelektroniki do obszaru tradycyjnych aparatów elektrycznych. Inspiruje ona badanie nowych problemów działania bardzo stromych przepięć w układach izolacyjnych aparatów, które są przedmiotem specjalności „wysokie napięcia”, innych przyszłościowych metod alternatywnego przesyłu energii elektrycznej.

Na pograniczu elektrotechniki i informatyki nowym zagadnieniem jest bezpieczeństwo sieci elektroenergetycznych (cybersecurity). Rozwój informatyki w ostatnich dwóch dekadach sprawił, że obecne aparaty, urządzenia i systemy elektroenergetyczne są oparte na rozwiązaniach informatycznych.

W wymienionych prognozach rozwoju elektroenergetyki mieszczą się i często są podstawowymi zagadnieniami inżynierii wysokich napięć i silnych prądów w technice przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Problematyka tej dziedziny i wymienione wcześniej jej kierunki rozwojowe, stanowią obszar tematyczny działalności naukowej Sekcji Wielkich Mocy i Wysokich Napięć KE/PAN, wnoszącej wkład do rozwoju „Elektrotechniki” jako dyscypliny i są częścią projektu „Mapa rozwoju dyscypliny „Elektrotechnika” i technologii związanych”.

## 2.2.1 Wysokie napięcia

Wprowadzenie.

Tematyka prac badawczych i aplikacyjnych Sekcji Wielkich Mocy i Wysokich Napięć dotyczy szczegółowych zagadnień związanych z realizacją techniczną funkcji spełnianych przez podstawowe działy elektroenergetyki: wytwarzanie, przesył i rozdział energii elektrycznej.

W ramach tych działów prace badawcze i aplikacyjne o charakterze rozwojowym w obszarze merytorycznym „Wysokich Napięć” dotyczą następujących grup problemów:

1. Modernizacja i rozwój nowych konstrukcji aparatów i urządzeń, wynikające z postępu inżynierii wysokich napięć.

2. Zapewnienie wymaganego poziomu niezawodności w eksploatacji urządzeń i aparatów i znacząca rola modernizacji ich konstrukcji.
3. Minimalizacja środowiskowych i zdrowotnych narażeń, będących konsekwencją stosowania w systemie elektroenergetycznym nowoczesnych technologii i konstrukcji.
4. Poprawa efektywności energetycznej w obszarze wytwarzania, przesyłu i zużycia energii elektrycznej przy wykorzystaniu zaawansowanych systemów zarządzania energią. Widoczna jest tutaj rola inżynierii wysokich napięć, w szczególności znaczenie różnych technik diagnostycznych dla strategii zarządzania majątkiem.
5. Konsekwencje badawcze dla inżynierii wysokonapięciowej, wynikające z wprowadzania technologii wytwarzania energii w źródłach odnawialnych oraz z systemów energetyki rozproszonej.

Streszczając wymienione grupy problemów, można wskazać następujące dwa podstawowe tematy o charakterze rozwojowym, w dalszym ciągu bliżej opisane:

- modernizacja konstrukcji elementów systemu elektroenergetycznego,
- niezawodność elementów systemu elektroenergetycznego.

### **2.2.2 Modernizacja konstrukcji elementów systemu elektroenergetycznego**

Elementami systemu elektroenergetycznego są urządzenia i aparaty niskiego-, wysokiego- i najwyższego napięcia. Budowa i eksploatacja układów izolacyjnych wymienionych elementów należą do zakresu zainteresowań merytorycznych Sekcji Wielkich Mocy i Wysokich Napięć.

Następujące problemy teoretyczne są źródłami modernizacji i rozwoju układów izolacyjnych i stanowią projektowane kierunki prac rozwojowych w ramach „Mapy rozwoju dyscypliny elektrotechnika”:

1. Projektowanie układów izolacyjnych.

Główne kierunki prac w tym zakresie dostarczają informacji do budowy układów izolacyjnych, spełniających określone wymagania pod względem niezawodności i oczekiwanego czasu eksploatacji. Służą temu prace nad następującymi problemami

a. Modelowanie matematyczne narażeń przepięciowych pochodzenia wewnętrznego i zewnętrznego w warunkach eksploatacyjnych i zakłóceńowych.

Wynikają stąd następujące zadania do dalszych opracowań:

- metody aproksymacji przepięć łączeniowych o dużej stromości przebiegu czoła napięcia;
- metody aproksymacji przepięć atmosferycznych ze szczególnym uwzględnieniem koordynacji skutków z urządzeniami ograniczającymi;
- metody aproksymacji przepięć generowanych przez urządzenia energoelektroniczne.

b. Modelowanie matematyczne pól elektrycznych i magnetycznych oraz pól cieplnych w warunkach eksploatacyjnych i zakłóceńowych aktualnych oraz przewidywanych w przyszłości:

Wynikają stąd następujące zadania do dalszych opracowań:

- metody analitycznego i numerycznego rozwiązywania równań polowych opisujących rozkłady wektorów natężeń w polach elektrycznych i magnetycznych oraz rozkłady temperatury w polach cieplnych, w szczególności w układach o złożonej konstrukcji oraz w warunkach działania pól sprzężonych;
- optymalizacja metod numerycznych. Adaptacja programów profesjonalnych do szczególnych warunków konstrukcji układów izolacyjnych wysokiego napięcia.

c. Metody laboratoryjne weryfikacji i walidacji efektów prac teoretycznych

Wynikają stąd następujące zadania do dalszych opracowań:

- rozwój metod i bazy laboratoryjnej generowania symulowanych narażeń napięciowych, cieplnych i środowiskowych dla szczególnych warunków konstrukcji układów izolacyjnych wysokiego napięcia;
- rozwój metod detekcji sygnałów diagnostycznych i przetwarzania wyników badań eksperymentalnych wpływu procesów starzeniowych w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych i w układach zestykowych aparatów.

d. Aplikacja efektów inżynierii materiałów elektrotechnicznych dla rozwoju konstrukcji i technologii układów izolacyjnych wysokich napięć

Oprócz wymienionych kierunków prac nad modernizacją konstrukcji niskonapięciowych układów izolacyjnych, opartych na modelowaniu matematycznym i fizycznym zjawisk i procesów w układach izolacyjnych, istnieją duże możliwości rozwoju w tej dziedzinie jako skutek postępu w inżynierii materiałów elektroizolacyjnych.

Wynikają stąd następujące zadania do dalszych opracowań:

- Materiały izolacyjne stałe w zastosowaniach wewnętrznych:
  - dopuszczenie w konstrukcjach urządzeń wartości gęstości objętościowej energii pola elektrycznego większych niż powszechnie obecnie przyjmowane i od dawna ustalone,
  - rozwój materiałów polimerowych o dużej przewodności cieplnej, mikrokompozytów, nanomateriałów i nanokompozytów,
  - oprócz problemu podstawowego zastosowania nowych materiałów w konstrukcjach układów izolacyjnych wskazane jest podjęcie badań możliwego wpływu procesów technologicznych nowoczesnych nanomateriałów i nanokompozytów na warunki zdrowotne zatrudnionego personelu.
- Materiały izolacyjne stałe w zastosowaniach zewnątrznych:
  - zapewnienie odporności na działanie narażeń środowiskowych, w szczególności z uwzględnieniem synergii narażeń elektrycznych i cieplnych,
  - rozwój materiałów polimerowych i kompozytowych.
- Rozwój dielektryków ciekłych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych.
- Materiały izolacyjne gazowe:
  - rozwój gazowych i próżniowych układów izolacyjnych, w których barierami, wyznaczającymi budowę układów są zjawiska jonizacji gazów i emisji polowej z katody,
  - konieczność ograniczania SF<sub>6</sub> w konstrukcjach średnich napięć niepożądanego ze względów środowiskowych sugeruje potrzebę badań nad równoważnymi zamiennikami gazowymi.

### **2.2.3. Niezawodność elementów układu elektroenergetycznego**

Wymagana niezawodność urządzeń elektroenergetycznych jest następstwem normowanych warunków pewności zasilania energią dla odbiorców. Jest to podstawowe zadanie w systemie zarządzania eksploatacją. Zarówno elementy systemu jak i wykonawcy na etapie procesów budowlanych oraz obsługa w eksploatacji muszą odpowiadać aktualnym standardom i certyfikacji, które wynikają z współczesnych badań w dziedzinie wysokich napięć. Służąca tym celom stała aktualizacja i nowelizacja procedur normalizacyjnych korzysta z współczesnych badań w dziedzinie wysokich napięć i te relacje powinny być rozwijane.

Jednym z elementów systemu zapewnienia niezawodności w zakresie przedstawionego tematu szczegółowego jest diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych i najwyższa jej forma – monitoring. Prawidłowa interpretacja wyników badań diagnostycznych opiera się na wiarygodnej znajomości procesów starzeniowych i wynikających z nich kryteriów kwalifikujących stan układu izolacyjnego dla różnych rodzajów urządzeń elektroenergetycznych. W szczególności znaczny rozwój urządzeń energoelektronicznych wymaga objęcia stosowanymi dotąd procedurami badań starzeniowych również układów elektroizolacyjnych pracujących w warunkach narażeń istniejących w tych urządzeniach. Charakterystycznymi są tu na przykład narażenia napięciowe o bardzo krótkim czasie narastania impulsu.

Powiększanie skuteczności i wiarygodności metod badań diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych dla zwiększenia niezawodności pracy układów elektroenergetycznych oparte jest na następujących kierunkach, które są elementami „*Mapy rozwoju dyscypliny Elektrotechnika*”:

### **1) Rozwój metod detekcji defektów układów elektroizolacyjnych.**

Źródłem informacji w tej technice są sygnały elektryczne, akustyczne, cieplne, IR, UV i chemiczne.

Przykłady:

- sygnały napięciowe, prądowe i akustyczne od wyładowań niezupełnych,
- sygnały temperaturowe od lokalnych pól cieplnych,
- detekcja i rozpoznawanie chemicznych produktów degradacji elementów układów izolacyjnych i zestykowych.

Wynikają stąd następujące zadania do dalszych opracowań:

- rozwój metod pomiarowych, diagnostycznych i monitoringu oraz metod eksperckich wspierających decyzje diagnostyczne w oparciu o nowoczesne układy elektroniczne, optoelektroniczne, energoelektroniczne i zaawansowane oprogramowanie IT. Szczególne obiekty zastosowań: transformatory energetyczne wysokich napięć, podobciążeniowe przełączniki zaczeów, linie napowietrzne, kable i linie kablowe najwyższych napięć różnych konstrukcji,
- rozbudowa laboratoriów badawczych wyposażonych w systemy i aparaty pomiarowe dla prowadzenia badań nowych materiałów i prób starzeniowych,

- rozwój metod matematycznych przetwarzania sygnałów jako źródła informacji o stanie układu izolacyjnego i zestykowego.

Przedmiotem dalszych prac do tych celów są następujące metody:

- analiza widmowa, metody korelacyjne;
- rozpoznawanie obrazów;
- metody sztucznej inteligencji: sieci neuronowe, logika rozmyta;
- „data mining”, klasteryzacja;
- klasyfikacja statystyczna: Bayesa, geometryczna, wielomianowa;

i inne.

## **2) Procedury logiczne i informatyczne w zastosowaniu do opracowania diagnoz stanów urządzeń**

Podjęcie decyzji o eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych i systemu jest funkcją informacji uzyskiwanych z diagnostyki urządzeń. Kierunek ten ma szczególne znaczenie dla zarządzania majątkiem według przyjętej strategii.

Wynikają stąd następujące zadania do dalszych opracowań:

- badania możliwości zastosowania informacji uzyskiwanych w technikach diagnostycznych do zarządzania majątkiem, na przykład określanie terminów wymian eksploatowanych elementów, racjonalna gospodarka urządzeniami,
- ocena ryzyka wystąpienia defektów i jego związku z badaniami mechanizmów fizykalnych procesów starzeniowych w układzie izolacyjnym i zestykowym,
- przygotowanie systemów przetwarzających wyniki analiz technicznych na wskaźniki ekonomiczne uzasadniające podejmowanie decyzji inwestycyjnych. Systemy takie powinny być dedykowane różnym grupom urządzeń (np. dla transformatorów – TrafoGrade).

Podstawowe źródła teoretyczne tematu szczegółowego

Temat szczegółowy, rozwijany w Sekcji Wielkich Mocy i Wysokich Napięć korzysta przede wszystkim z następujących dziedzin:

1. Elektrotechnika teoretyczna, teoria pola elektromagnetycznego i jego szczególne przypadki.



2. Fizyka i chemia ciała stałego, w szczególności fizykochemia polimerów syntetycznych.
3. Fizyka i chemia gazów syntetycznych.
4. Teoria i przetwarzanie sygnałów jedno- i wielowymiarowych w zastosowaniu do interpretacji wyników pomiarów w diagnostyce.

### 2.2.5 Przykłady wybranych problemów teoretycznych

Problemy teoretyczne i konstrukcyjne określają cele badawcze i wskazują możliwości ich realizacji. Należą do nich w szczególności:

1. Działanie silnych pól oraz innych narażeń środowiskowych (wysokie ciśnienia i temperatury, promieniowanie radiacyjne, zabrudzenia) w:
  - materiałach izolacyjnych stałych- są to efekty działania energii pola elektrycznego na strukturę fizykochemiczną na poziomie nadmolekularnym i molekularnym,
  - materiałach izolacyjnych gazowych - są to efekty emisji polowej w silnych polach elektrycznych ( $> 10^8$  [V/m]) jako granica możliwości konstrukcyjnych urządzeń elektroenergetycznych.
2. Efekty pól elektromagnetycznych w elektroenergetyce uwzględniane dla celów konstrukcyjnych lub diagnostycznych, na przykład:
  - indukowanie napięć w liniach kablowych w różnych sytuacjach eksploatacyjnych,
  - propagacja napięć w liniach kablowych i napowietrznych.
3. Silne pola magnetyczne wytwarzane przez tory wieloprądowe w urządzeniach elektroenergetycznych inspirują tematy teoretyczne działania takich pól w otaczającym środowisku naturalnym i technicznym.
4. Narażenia od wyładowań atmosferycznych: mechanizm wyładowania piorunowego, napięcia i prądy indukowane w obiektach – zastosowania do oceny zagrożeń wrażliwych urządzeń elektronicznych.
5. Narażenia przepięciowe jako efekty eksploatacji urządzeń energoelektronicznych.
6. Kompatybilność elektromagnetyczna rozproszonych źródeł wytwarzania energii elektrycznej z systemem elektroenergetycznym, konsekwencje rozwoju energetyki rozproszonej dla inżynierii wysokonapięciowej w zakresie konstrukcji i eksploatacji.

## 2.2.6 Charakterystyka metodyczna tematu szczegółowego

Przedstawione tematy Sekcji Wielkich Mocy i Wysokich Napięć charakteryzują się wzajemnym wpływem funkcji teoretycznej i funkcji aplikacyjnej w zakresie merytorycznym określonym w p. 2.2.

Oznacza to uzupełnianie się kierunków działań:

- a) z jednej strony postęp techniczny w elektroenergetyce podpowiada i inspiruje kierunki badań i analiz teoretycznych zmierzających do optymalizacji istniejących już konstrukcji i zwiększenia efektywności ich wykorzystania w systemie,
- b) z drugiej strony wyniki analiz teoretycznych wskazują na możliwości rozwoju modeli nowych konstrukcji lub modernizacji istniejących.

## 2.3 Materiały i Technologie Elektrotechniczne

*Redakcja: naukowa: prof. dr hab. inż. Ryszard Kacprzyk, Politechnika Wroclawska*

*Autorzy:*

*dr hab. inż. Tomasz Chady, Zachodnio-Pomorski Uniwersytet Techniczny,  
dr hab. Marek Florkowski, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB,  
prof. dr hab. Stanisław Gubański, Chalmers University of Technology, Goeteborg, Sweden,  
prof. dr hab. inż. Ryszard Kacprzyk, Politechnika Wroclawska,  
dr inż. Grzegorz Paściak, Politechnika Wroclawska,  
dr hab. inż. J. Rezmer, Politechnika Wroclawska,  
prof. dr hab. inż. Ryszard Sikora, Zachodnio-Pomorski Uniwersytet Techniczny,  
prof. dr hab. inż. Jacek Wańkowicz, Instytut Energetyki, Warszawa,  
prof. dr hab. inż. Wiesław Wilczyński, Instytut Elektrotechniki, Warszawa,  
prof. dr hab. inż. Romuald Włodek, AGH.*

### 2.3.1 Materiały elektryczne

Materiały elektryczne, często nazywane elektro-magnetycznymi obejmują zarówno materiały stosowane w elementach i urządzeniach tradycyjnych, odgrywających nadal podstawową rolę w wytwarzaniu, przesyłce oraz konsumpcji energii elektrycznej jak również materiały stosowane w nowych rozwiązaniach lub niezbędnych do opracowania nowych koncepcji. W pierwszym przypadku chodzi o materiały, które tradycyjnie dzieli się na przewodzące, nieprzewodzące i magnetyczne, którym to materiałom stawia się specyficzne wymagania umożliwiające podwyższenie parametrów urządzeń budowanych na ich bazie (np. wyższą temperaturę pracy, niższe straty energii etc). W drugim przypadku chodzi o materiały wykazujące specyficzne właściwości elektryczne, umożliwiające ich wykorzystanie w opracowanych w ostatnich latach lub całkowicie nowych, niekonwencjonalnych konstrukcjach. Przykładem mogą być ceramiczne i elektrolity z silnym przewodnictwem jonowym, materiały z właściwościami silnie nieliniowymi, cała grupa tzw. materiałów inteligentnych i wiele innych. Z materiałów elektrotechnicznych

proponuje się wyłączyć materiały półprzewodnikowe, stosowane w technologiach przyrządów półprzewodnikowych. Wynika to zarówno ze specyfiki ich wytwarzania jak i właściwości.

Ważnym elementem problematyki „Materiałów i Technologii Elektrotechnicznych” są badania nieniszczące, zwłaszcza w zakresie metod elektromagnetycznych. Metody takie jak tomografia impedancyjna, metoda magnetycznego strumienia rozproszonego, szumów Barkhausena i prądów wirowych oraz inne (termografia, metoda terahercowa) mają już obecnie poważny udział w badaniach nieniszczących i diagnostyce materiałów i elementów - patrz Dodatek D1. Metody te mogą odegrać szczególną rolę zwłaszcza w zakresie materiałów i obiektów przeznaczonych dla energetyki jądrowej.

### **2.3.1.1. Tendencje światowe**

#### *Materiały przewodzące.*

Prowadzone badania ukierunkowane są na:

1. Wytwarzanie i zastosowanie w elementach przewodzących urządzeń elektrycznych grafenów. Grafeny (monoatomowa warstwa węgla) przejrzyste, elastyczne, wykazują wyjątkowo wysoką ruchliwość elektronów  $\sim 105 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Potencjalnie mogą w wielu wypadkach zastąpić/wyeliminować krzem, znaleźć zastosowanie przy wytwarzaniu transparentnych elektrod, energooszczędnych źródeł światła, elementów fotowoltaicznych oraz produkcji wysokowydajnych akumulatorów, superkondensatorów czujników i innych. Jako nano-dodatek do tworzyw sztucznych grafeny pozwalają zmieniać ich przewodność elektryczną i przewodnościowe właściwości nieliniowe.
2. Ceramiczne i polimerowe materiały jonoprzewodzące do zastosowań w urządzeniach elektrochemicznych (ogniwa paliwowe, czujniki i pompy gazów, elektrolizery). Elementem ogniw paliwowych SOFC (solid oxide fuel cell), wpływającym w decydującym stopniu na jego sprawność działania, koszt wytworzenia, oraz stabilną i trwałą pracę jest elektrolit. Elektrolit powinien posiadać wysoką przewodność jonową (ok.  $0,1 \text{ S/cm}$ ) w możliwie niskich temperaturach, znikome przewodnictwo elektronowe, wysoką stabilność termiczną i inne.
3. Materiały nadprzewodzące o możliwie wysokiej temperaturze krytycznej do zastosowań w kablach, maszynach i urządzeniach elektrycznych.
4. Materiały przewodzące do zastosowań klasycznych (materiały stykowe, eliminujące metale szlachetne oraz metale ziem rzadkich, itp.).

### *Materiały nieprzewodzące.*

Prowadzone badania ukierunkowane są na:

1. Polimery (termoplasty) do izolacji kabli najwyższych napięć prądu przemiennego, odporne na zjawiska starzeniowe oraz posiadające obniżoną energię aktywacji procesu przewodnictwa (działania w zakresie niskoemisyjnego przesyłu energii, wymagające przejścia, szczególnie w terenach zurbanizowanych, z linii napowietrznych na kablowe).
2. Materiały elektroizolacyjne do pracy długotrwałej w silnych polach stałych (np. dla kabli WN DC w sieciach współpracujących z farmami wiatrowymi, również jako izolacja napowietrzna). Nanokompozyty dielektryczne umożliwiające polepszenie właściwości izolacji głównej, (np. pokrycia superhydrofobowe).
3. Dielektryczne kompozyty i nanokompozyty polimerowe z termoplastami, umożliwiające zastąpienie materiałów termoutwardzalnych (chodzi głównie o obniżkę kosztów produkcji oraz nieznaczny ich wpływ na środowisko).
4. Kompozyty dielektryczne o znacznie zwiększonym przewodnictwie cieplnym.
5. Ciecze izolacyjne biodegradowalne (oleje roślinne).
6. Mieszanki gazów dla zastąpienia SF<sub>6</sub>.
7. Rozwój konstrukcji izolatorów wsporczych i osłon opartych na rurze szkło-epoksydowej (o dużej sztywności) wypełnionej pianką izolacyjną.
8. Piezoaktywne materiały i struktury dielektryczne (Energy harvesting).

### *Materiały magnetyczne.*

Prowadzone badania ukierunkowane są na:

1. Superiorientowane (zmniejszenie średniego odchylenia kierunku łatwego magnesowania blach orientowanych z 7° do 3° w stosunku do kierunku walcowania) materiały magnetycznie miękkie, oraz blachy w wprowadzonych naprężeniach rozciągających - wykazujące wysoką indukcję nasycenia oraz niskie straty ( $B_{1000} \geq 1,95 \text{ T}$ ,  $P_{1,7/50} \geq 0,80 \text{ W/kg}$ ).
2. Materiały magnetyczne miękkie niskostratne do pracy przy wysokich częstotliwościach ( $10^4 - 10^5 \text{ Hz}$ ), materiały proszkowe oraz nanomateriały.
3. Materiały magnetycznie twarde ferrytowe oraz magnesy wytwarzane na bazie pierwiastków ziem rzadkich (neodymu i samaru), osiągające gęstości energii  $(BH)_{\max}$  powyżej  $400 \text{ kJ/m}^3$ .
4. Materiały magnetyczne o specjalnych właściwościach (gigantyczna magnetostrykcja, magnetoopór).

Inne materiały do zastosowań w elektrotechnice.

1. Kompozyty i nanokompozyty dla elektroenergetyki (półprzewodzące – m.in. do sterowania rozkładem pola elektrycznego, do zapobiegania osiadania sadzi na przewodach linii elektroenergetycznych itp.)
2. Kompozyty i nanokompozyty na bazie tworzyw organicznych o specjalnych właściwościach (polimerowe materiały pozystorowe – inteligentne grzejniki, materiały o konduktywności sterowanej ciśnieniem, polimerowe materiały wykazujące właściwości antystatyczne i ekranujące).
3. Materiały dla różnych technologii wytwarzania i magazynowania energii (np. ogniwo foto-woltaicznych (PV), ogniwa paliwowe, superkondensatory).

### **2.3.1.2 Stan i perspektywy w Polsce**

Materiały nieprzewodzące.

Badania wykonywane w kraju powinny obejmować:

1. Ocenę stanu izolacji papier-olej dla układów z estrami, z olejami mineralnymi oraz wpływu domieszek ulepszających (inhibitory, antyutleniacze, środków ograniczających gazowanie etc) na proces starzenia się izolacji papier-olej.
2. Ocenę możliwości wykorzystania olejów roślinnych jako biodegradalnych cieczy izolacyjnych.
3. Kompozyty polimerowe (od nanokompozytów do kompozytów strukturalnych) na elementy elektroizolacyjne i konstrukcyjne dla napowietrznych linii elektroenergetycznych niskiego, średniego i wysokiego napięcia oraz aparatury stacyjnej (np. izolatory kompozytowe, osłony ograniczników przepięć i inne). (Elastomery - Nowa Sarzyna, rury szkło-epoksydowe - Zakład Doświadczalny Instytutu Elektrotechniki w Międzyzlesiu Kłodzkim).

Materiały magnetyczne.

Produkowane w kraju metodą walcowania na zimno blachy anizotropowe i orientowane (walcownia Stalprodukt S.A., Bochnia) nie odbiegają swoim poziomem od właściwości magnetycznych blach produkowanych przez największych producentów. Rozwój technologii w zakresie innych materiałów magnetycznych (materiałów magnetycznie twardych, miękkich proszkowych itp.) oraz związane z nim poważne nakłady finansowe zagranicznych producentów spowodował, że powstała przepaść, która wydaje się nie do pokonania.

Celowym wydaje się ukierunkowanie badań wykonywanych w kraju na nanomateriały magnetyczne oraz materiały magnetyczne o specjalnych właściwościach (multiferroicznych; z gigantyczną magnetostrykcją; magnetorezystancją).

Materiały przewodzące i inne.

Badania wykonywane w kraju powinny obejmować:

1. Materiały stykowe ( w tym materiały wykorzystujące krajowe surowce – metale ziem rzadkich - KGHM).
2. Kompozyty i nanokompozyty polimerowe (antystatyczne kompozyty do produkcji wykładzin - Gamrat-Erg, wyrobów włókienniczych - IW. Łódź, materiały ekranujące, pozystorowe, inteligentne i inne o specjalnych właściwościach elektrycznych).

### **2.3.2. Elektrotechnologie**

Pojęcie technologia dotyczy działalności związanej z przetwarzaniem w sposób celowy, użyteczny i ekonomiczny dóbr naturalnych w dobra użyteczne. Tradycyjnym zakresem elektrotechnologii było wytwarzanie i przetwarzanie materiałów dla przemysłu elektrotechnicznego, sposoby wytwarzania urządzeń elektrotechnicznych i ich podzespołów oraz te sposoby wytwarzania (także poza przemysłem elektrotechnicznym), w których elektryka odgrywała decydującą rolę. Wydaje się, że pomimo wzajemnego przenikania się obszarów elektrotechnologii (ukierunkowanej na zakres silnych prądów i wysokich napięć) i technologii elektronowej, zachowują one w Polsce nadal swoją specyfikę i integralność. Przykładem wzajemnego przenikania się obu obszarów może być bateria ogniw fotowoltaicznych. Ich technologia, ze względu na czystość stosowanych materiałów czy specyfikę stosowanych procesów technologicznych jest przedmiotem technologii elektronowej. Z drugiej zaś strony poszukiwania optymalnych sposobów użytkowania tych źródeł energii wymaga zaangażowania narzędzi z obszaru elektrotechniki (współpraca z systemem elektroenergetycznym, wpływ na jakość energii i wiele innych).

#### **2.3.2.1. Tendencje światowe**

Rozwój w zakresie technologii elektrotechnicznych obejmuje:

1. Technologie materiałów elektrotechnicznych (patrz wyżej), w tym technologie kompozytów i nanokompozytów dielektrycznych; technologie kompozytów

półprzewodzących (antystatycznych, nieliniowych) oraz materiałów aktywnych (piezo-, piro); technologie proszkowe materiałów magnetycznych; technologie nadprzewodników wysokotemperaturowych; technologie materiałów dla PV, ogniw paliwowych oraz superkondensatorów.

2. Energooszczędne technologie elektrostatyczne (technologie oczyszczanie gazów – elektrofiltry, filtry elektretowe, elektrostatyczne lub elektrostatycznie wspomagane pokrywanie powierzchni (malowanie, oprysk - ochrona roślin i płodów rolnych, flokowanie), separacja elektrostatyczna, poligrafia, elektrostatyczne wyciąganie włókien (elektro-spinning) itp.).
3. Technologie plazmowe wykorzystujące plazmę gorącą (cięcie, wityfikacja odpadów, etc.)
4. Technologie plazmowe wykorzystujące plazmę niskotemperaturową (obróbka powierzchni ciał stałych (polimerów), obróbka powierzchni obiektów biologicznie czynnych, technologie cienkich warstw przewodzących i nieprzewodzących, rozkład lotnych substancji organicznych, plazmowo wspomagana kataliza, produkcja ozonu, itp.).
5. Elektroerozyjną obróbkę materiałów (obróbka metali, wiercenie skał).
6. Technologie fotowoltaicznych źródeł prądu (badania obejmują ogniwa jedno i wielo-złączowe, wykonywane na bazie krzemu, arsenku galu, tellurku kadmu i innych półprzewodników, w tym materiałów organicznych. Rozwijane są technologie w oparciu o struktury wykonywane z materiałów krystalicznych, polikrystalicznych i amorficznych. Wśród perspektywnych trendów dotyczących fotowoltaiki organicznej (polimerowej) należy wymienić prace związane z: (1) syntezą nowych materiałów organicznych zarówno polimerowych jak i małowcząsteczkowych, (2) syntezą i zastosowaniem związków organicznych o właściwościach ciekłokrystalicznych w warstwie aktywnej ogniwa, (3) otrzymaniem i zastosowaniem grafenu lub tlenku grafenu modyfikowanego chemicznie, jako elektrod (anody i/lub katody) lub międzywarstwy w ogniwie, oraz (4) zastosowaniem nanorurek, fulerenów,  $\text{TiO}_2$  oraz nanocząstek srebra i złota w ogniwie.
7. Technologie chemicznych źródeł prądu oraz ogniw paliwowych.
8. Technologie maszyn i urządzeń elektrycznych oraz ich elementów i podzespołów.

### 2.3.2.2 Stan i perspektywy w Polsce

Rozwój technologii w kraju powinien obejmować:

1. Badania w kierunku ulepszenie procesu technologicznego oraz właściwości izolatorów z ceramiki wysokoglinowej (ZAPEL S.A. eksport około 70-80 % produkcji) (Ad. 8).
2. Technologie izolatorów kompozytowych w oparciu o surowce krajowe (elastomery) (Ad. 1, 8).
3. Technologie polimerowych kompozytów półprzewodzących (ekranujących, antystatycznych, inteligentnych itp).
4. Rozwój technologii ogniw SOFC i PEMFC.
5. Rozwój technologii superkondensatorów.
6. Rozwój technologii plazmowych.
7. Rozwój energooszczędnych technologii elektrostatycznych.

## 2.4. Maszyny Elektryczne i Transformatory

*Redakcja naukowa: prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, Politechnika Śląska,  
prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski, Politechnika Łódzka.*

Wprowadzenie.

Maszyny elektryczne (turbogeneratory i hydrogeneratory) i transformatory blokowe stanowią główne elementy systemu elektroenergetycznego w obszarze wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej. Transformatory rozdzielcze odgrywają rolę pośredniczącą w systemach przesyłowych i dystrybucyjnych. Silniki wykonawcze o różnych zasadach działania i właściwościach są powszechnie stosowane w napędach: maszyn roboczych, pojazdów trakcyjnych, urządzeń gospodarczych itp. Nic nie wskazuje na to, aby dotychczasowa rola maszyn elektrycznych i transformatorów mogła ulec zmniejszeniu.

### 2.4.1. Maszyny elektryczne

Wstęp.

Polska jest znaczącym producentem maszyn elektrycznych. Fabryki maszyn elektrycznych pomyślnie przeszły transformację gospodarczą w latach 90-ych XX wieku. Stało się tak, gdyż maszyny elektryczne produkowane w tych fabrykach



spełniały standard światowy i mimo ograniczonej sprzedaży w Polsce i krajach Europy Wschodniej, to eksport maszyn elektrycznych do USA, Kanady i krajów Europy Zachodniej, zaowocował tym, że fabryki nie zbankrutowały. Maszyny elektryczne były projektowane w kraju i były produkowane według własnej technologii. Fabryki maszyn elektrycznych jako jedne z pierwszych zostały wszystkie sprywatyzowane.

Stan obecny jest następujący:

- generatory synchroniczne są produkowane i remontowane w fabryce EthosEnergy Poland SA. w Lublińcu (dawniej ENERGOSERWIS, a następnie TurboCare) i w firmie ALSTOM we Wrocławiu (dawniej DOLMEL),
- silniki indukcyjne w firmie Cantoni Motor S.A. do której należą fabryki: BESEL, INDUKTA, CELMA i EMIT oraz w fabryce TAMEL (BROOK CROMPTON ATB Technology in Motion. ATB Tameł S.A.).

W lipcu 2009 roku Komisja Europejska przyjęła Rozporządzenie Nr 640/2009 w sprawie wdrażania Dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczącej wymogów ekoprojektu dla silników elektrycznych. Oznacza to, że na terenie Unii Europejskiej wprowadzone zostały usankcjonowane prawnie wymogi dotyczące efektywności energetycznej 3-fazowych silników indukcyjnych 2, 4 i 6-biegunowych sprzedawanych na rynku unijnym. Klasyfikację i oznakowanie IE wprowadza norma IEC 60034-30. Nowy sposób klasyfikacji obowiązuje dla silników 2, 4 i 6-biegunowych o mocach od 0,75 do 375 kW i napięciu znamionowym do 1000 V. Od dnia 1 stycznia 2015 r. silniki indukcyjne (a od 01.01. 2017 r. wszystkie silniki) o mocy znamionowej w zakresie 7,5–375 kW muszą odpowiadać co najmniej klasie sprawności IE3 (najwyższy poziom sprawności - premium), lub odpowiadać klasie sprawności IE2 (silniki o podwyższonej sprawności - high efficiency), przy założeniu zastosowania ich w układzie napędowym o regulowanej prędkości obrotowej.

#### **2.4.1.1. Aktualne zadania badawcze**

Aktualne zagadnienia badawcze w zakresie generatorów synchronicznych powinny obejmować sferę projektowania, technologii, badań w fabryce i zabezpieczenie niezawodnej eksploatacji oraz diagnostykę. Od lat 60-ych XX wieku prowadzono badania w koncernach światowych, a także w Polsce, nad wykorzystaniem nadprzewodnictwa w obwodzie wzbudzenia. Jak dotychczas nadprzewodnictwo nie jest szerzej wykorzystywane w konstrukcji generatorów synchronicznych, gdyż koszty z tym związane są za duże. Postęp w inżynierii

magnesów trwałych stworzył warunki do budowy generatorów synchronicznych ze wzbudzeniem hybrydowym. Obniży się w ten sposób straty mocy wzbudzenia, a więc uzyska się ten sam efekt, który oczekiwano uzyskać stosując nadprzewodnikowy układ wzbudzenia. Hybryda mogła by mieć około (80 – 90)% wzbudzenia magnesami trwałymi i około (20 – 10)% wzbudzenia elektromagnetycznego, które zapewniałoby wymagany zakres regulacji strumienia wzbudzenia.

Aktualne zagadnienia badawcze w silnikach i napędach elektrycznych powinny koncentrować się na energooszczędności [2], a więc na budowie maszyn o zmniejszonych stratach mocy, pracujących niezawodnie i nie wymagających częstych przeglądów i remontu. Z wieloletniego doświadczenia przemysłowego wiemy, że znaczna część pracujących w Polsce napędów jest zaprojektowana nieekonomicznie, maszyny elektryczne nie są poprawnie dobrane do wymagań układu napędowego. Dotyczy to przede wszystkim silników indukcyjnych wysokiego napięcia zasilanych bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej. Na przykład pompy chłodzące w hutach są uruchamiane kilkadziesiąt razy na dobę, a zastosowane silniki wytrzymują 3000 – 5000 rozruchów, wentylatory na szybach wentylacyjnych w kopalniach mają czasy rozruchu dochodzące do kilkudziesięciu sekund, a silniki mają dopuszczalny czas rozruch 20 sekund. W większości napędów stosuje się silniki przewymiarowane, co zmniejsza sprawność energetyczną napędu. W świetle tych przykładów podwyższona sprawność energetyczna silników elektrycznych nie determinuje kosztów eksploatacyjnych napędu, gdyż oszczędność energii w kosztach całkowitych eksploatowanego napędu stanowi znikomy procent. Jednak trendy światowe są takie aby produkować maszyny elektryczne o coraz wyższej sprawności. Na przykład w USA i Kanadzie, już od roku 1997, jest prawnie zakazana sprzedaż silników indukcyjnych nie spełniających warunku sprawności podanych w standardzie NEMA.

W sposób znaczący można zwiększyć sprawności maszyn elektrycznych poprzez stosowanie w ich konstrukcji magnesów trwałych. Ponadto magnesy trwałe pozwalają zmniejszyć masę maszyny w stosunku do obecnie powszechnie stosowanych maszyn indukcyjnych [1]:

- w maszynach małej mocy (o mocy znamionowej do 10kW) sprawność można podwyższyć o około 8% i masę zmniejszyć o około 30%,
- w maszynach średniej mocy (o mocy znamionowej do 100kW) sprawność można podwyższyć o około 4% i masę zmniejszyć o około 20%,
- w maszynach dużej mocy sprawność można podwyższyć o około 2% i masę zmniejszyć o około 10%,

- w prądnicach synchronicznych ze wzbudzeniem hybrydowym można zmniejszyć straty wzbudzenia o około 80%.

Do napędów pracujących przy stałej prędkości obrotowej, mogą być stosowane silniki asynchroniczne synchronizowane polem magnetycznym magnesów trwałych zasilane bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej i z rozruchem asynchronicznym.

Do napędów pracujących przy zmiennej prędkości obrotowej, mogą być stosowane silniki [2]:

- bezszczotkowe prądu stałego BLDCPM, (Brush-Less Direct Current Motor) i BLSMPM (Brush-Less Permanent Magnet Synchronous Motor), które są zasilane napięciem stałym poprzez komutator energoelektroniczny (silniki BLDCPM mają jedną strefę regulacji prędkości obrotowej, przy stałym momencie, a regulacja prędkości obrotowej jest realizowana poprzez zmianę napięcia stałego, silniki BLSMPM mają dwie strefy regulacji prędkości obrotowej: przy stałym momencie poprzez zmianę napięcia stałego i przy stałej mocy poprzez odwzbudzenie smm twornika),
- synchroniczne PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), które są zasilane z falowników, a regulacja prędkości obrotowej odbywa się poprzez zmianę częstotliwości napięcia falownika.

Prądnice synchroniczne ze wzbudzeniem magnesami trwałymi, plus falownik energoelektroniczny wydają się być ekonomicznym źródłem energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych i małych elektrowniach wodnych, umożliwiając bowiem pracę turbiny wiatrowej i wodnej ze zmienną prędkością obrotową dostosowaną do aktualnej mocy wiatru bądź wody. Zwiększa to, o kilka procent wykorzystanie energii wiatru i wody. Prądnice ze wzbudzeniem hybrydowym, nie wymagają falownika i mogą być stosowane w spaliniowych agregatach prądotwórczych pracujących przy stałej prędkości obrotowej.

Ponadto aktualne zadania badawcze w tematyce przetworników elektromechanicznych powinny obejmować:

- maszyny o nowych strukturach obwodu elektromagnetycznego, o rdzeniach proszkowych, wzbudzeniu hybrydowym itp.,
- maszyny elektryczne dostosowane do napędu pojazdów zasilane ze źródeł solarnych,
- maszyny o ruchu złożonym i wielu stopniach swobody,
- przetworniki o ruchu liniowym,

- łożyska magnetyczne i układy lewitacji,
- przetworniki z cieczą magnetyczną,
- przetworniki magnetostrykcyjne,
- przetworniki piezoelektryczne,
- przetworniki wykorzystujące zjawiska sprzężone termiczno-elektromagnetyczne,
- siłowniki elektromagnetyczne nowej generacji do awioniki i motoryzacji.

W zakresie pomiarów i diagnostyki maszyn elektrycznych celem byłoby opracowanie zbioru zunifikowanych parametrów kryterialnych i opracowanie skali oceny stanu technicznego maszyn elektrycznych (dla każdego rodzaju maszyn):

- opracowanie skutecznych metod monitoringu dużych turbogeneratorów (drżania, przegrzania lokalne, prądy łożyskowe itp.).
- określenie metody, opracowanie nowych czujników (np. wyładowań niezupełnych) i pozyskiwanie sygnałów diagnostycznych.
- uproszczenie metod diagnostycznych on-line poprzez zidentyfikowanie zależności między np. drżaniami węzłów łożyskowych i spektrum harmonicznym w prądzie i napięciu twornika,
- ocena stanu technicznego uzwojeń (np. klatki wirnika silnika indukcyjnego) i ocena stanu symetrii szczeliny powietrznej na podstawie przebiegu czasowego prądu maszyny [3],
- ocena on-line stanu technicznego izolacji głównej i zwojowej np. na podstawie analizy przebiegu składowej zerowej prądu, to jest prądu płynącego przez układ izolacyjny [3].

Tworzenie centrów diagnostycznych i archiwizacji danych eksploatacyjnych dla maszyn strategicznych (np. generatorów synchronicznych i transformatorów w elektrowniach), w tym:

- zdalna kontrola maszyn elektrycznych powierzonych nadzorowi,
- powiadamianie służb odpowiedzialnych za eksploatację maszyn o symptomach wystąpienia awarii,
- gromadzenie, archiwizacja danych pomiarowych w celu przeprowadzania analiz poawaryjnych i w celach poznawczych.

## 2.4.2. Transformatory energetyczne

Wstęp.

W Polskim systemie przesyłowym pracuje ok. 200 sztuk transformatorów sieciowych o mocy 160 MVA i większej, górnym napięciu przewodowym 220 kV i 400 kV. Transformatory dużych mocy (grupy I i II) zainstalowane w energetyce krajowej zostały wyprodukowane przez fabryki w Żychlinie, Łodzi (ELTA, ABB), dawne Zakłady remontowe Energetyki w Lublińcu (obecnie EthosEnergy Poland S.A.), a transformatory mniejszej mocy w Łodzi-Janowie (POLIMEX, MOSTOSTAL ZREW). Pojedyncze jednostki blokowe i sieciowe pochodzą z Austrii (ELIN), Japonii (HITACHI), Ukrainy (ZAPOROŻTRANSFORMATOR), a ostatnio z Korei Południowej (HYUNDAI). Duża liczba transformatorów ma staż, po zainstalowaniu, dłuższy niż 30 lat. Polska ma dobre tradycje w produkcji transformatorów [4].

### 2.4.2.1 Aktualne zagadnienia badawcze

Aktualne zagadnienia badawcze, które dotyczą transformatorów powinny obejmować sferę projektowania, technologii, badań w wytwórni i niezwykle istotnej gospodarczo sfery eksploatacji. Podstawowe wymagania, które musi spełniać transformator w czasie pracy dotyczą wytrzymałości mechanicznej, elektrycznej i termicznej [6]. Na czoło wysuwają się zatem zjawiska elektromagnetyczne, będące przyczyną powstawania strat podstawowych i dodatkowych, sił zwarciovych w wyniku ewentualnych awarii, zagadnienia wytrzymałości dielektrycznej, związane z rozkładem pól potencjalnych i rozkładów powstających w wyniku elektryzacji strumieniowej, a także zjawiska związane z wyładowaniami niezupełnymi. Zagadnienia nagrzewania i skutecznego chłodzenia transformatorów, a zwłaszcza właściwej obciążalności w różnych warunkach klimatycznych są przedmiotem ciągłych badań.

Szczególną rolę odgrywa diagnostyka transformatorów stosowana w zakresie zarządzania eksploatacją transformatorów [5]. Ten kierunek badań jest intensywnie rozwijany w sensie metodologicznym i narzędziowym. Należy podkreślić, że w Polsce zagadnienia monitoringu transformatorów, badań okresowych czystości i wytrzymałości oleju, łącznie z analizą chromatograficzną, badania przepustów wysokiego napięcia itp. są przedmiotem szczególnej troski [5]. Przytoczona w pracy literatura nie obejmuje wszystkich zagadnień, które zostały poruszone w tekście. W szczególności, przykładowe prace konferencyjne świadczą o aktualności naukowej i technicznej problematyki transformatorowej w Polsce.

### **2.4.2.2. Problematyka elektromagnetyczna w projektowaniu transformatorów**

Współczesna technika komputerowa pozwala na przedstawienie poszczególnych elementów transformatora, lub części jego układów, a także widoku zewnętrznego w konwencji trójwymiarowej z możliwością obrotu i specjalnego podświetlenia obiektu. Do tego służą, między innymi, programy komercyjne AUTOCAD i AUTODESK. Transformator składa się z uzbrojonego rdzenia, uzwojeń, przełącznika zaczeów, zbioru przewodów łączeniowych i wyprowadzeń, które można odwzorować z dość dużą dokładnością pod względem proporcji wymiarowych.

Rdzeń transformatora składa się z ogromnej ilości blach magnetycznych, przeplatanych w narożach i węzłach, najczęściej tworzących rdzenie jedno-, a niekiedy wieloramowe. Każda warstwa blach stanowi wydzielony obwód magnetyczny. Trójwymiarowa analiza pola elektromagnetycznego z uwzględnieniem rozwiązań w poszczególnych warstwach przekracza możliwości obecnych programów obliczeniowych w rodzaju ANSYS, FLUXA, OPERY i innych. Modele traktujące rdzeń jako element jednolity, wymagają określenia zastępczych-równoważnych przenikalności i przewodności elektrycznych rdzenia, co jest obecnie przedmiotem prac badawczych. Szczególnym obszarem są naroża i węzły, w których zaplatane są blachy, gdzie zmiana kierunku strumienia powoduje zwiększone straty mocy.

Znacznie lepiej przedstawiają się możliwości obliczeniowe pól rozproszenia. Obszary rdzenia można traktować w przybliżeniu jako pozbawione prądów wirowych, o przenikalności magnetycznej dążącej do nieskończoności. Najczęściej wprowadza się do obliczeń fragmenty transformatora. Wynika to najczęściej z symetrii obiektu. Można także rozpatrywać węzły elektromagnetyczne w postaci wyizolowanej, zwłaszcza wtedy, gdy mają odmienne wyprowadzenia przewodów, inne odstępy od kadzi i pokrywy itp.

Spotyka się obecnie trójwymiarowe rozwiązania pól z wykorzystaniem pakietów komercyjnych dla potrzeb wyznaczania lokalnych strat w częściach konstrukcyjnych, ekranach, czy też określania rozkładu sił zwarciovych w uzwojeniach nieuszkodzonych i uszkodzonych [7].

Niezwykle ważne jest obliczenie na etapie projektowania rozkładów napięć i natężeń pola elektrycznego w układzie izolacyjnym transformatora, ze względu na kryteria wytrzymałości na przebicie. Obliczenia te, w konwencji trójwymiarowej, wykonuje się również dla istotnych fragmentów transformatora lub węzłów izolacyjnych w rodzaju wyprowadzeń z obszarów wysokiego napięcia. W wyniku

obliczeń projektowych udaje się skonstruować uniwersalną izolację stałą, wyprowadzenia mocy na wysokim napięciu, czego przykładem może być modułarny układ izolacyjny odpływu 400 kV transformatora blokowego, czy też izolacja ceramiczna przekładnika kombinowanego. Należy zwrócić uwagę na potrzebę aplikacji metod polowych do rozwiązywania rozkładów pól w dielektrykach stałych i ciekłych, w warunkach pola przepływowego, wywołanego przykładowo w transformatorach HVDC.

Metody komputerowe powinny rozwijać się w kierunku badania nie tylko możliwych, ale także dopuszczalnych uproszczeń geometrycznych obiektów, bez większego uszczerbku na dokładności obliczeń parametrów całkowitego pola [7].

### **2.4.2.3. Diagnostyka eksploatacyjna transformatorów energetycznych**

Transformatory stanowią jeden z droższych składników sieci elektroenergetycznych. Dbłość o ich zdolność eksploatacyjną wiąże się z nakładami finansowymi. Pod rozpowszechnionym pojęciem zarządzania eksploatacją transformatorów kryją się nowoczesne sposoby dyspozycji, nadzoru i sterowania tymi urządzeniami połączone z coraz doskonalszą diagnostyką techniczną.

W ramach Komitetu Studiów A2 CIGRE powołana została Grupa Robocza A2-20 "Aspekty ekonomiczne gospodarowania transformatorami". Doświadczenia polskie w tym zakresie są znaczące [5]. W wyniku prac wspomnianej Grupy powstał przewodnik przeznaczony dla personelu, który odpowiada za ekonomiczne aspekty zarządzania eksploatacją transformatorów. Obejmuje on cztery obszary:

- zarządzanie ryzykiem,
- wymagane warunki techniczne i zakupy,
- zagadnienia eksploatacyjne,
- procedury decyzyjne: naprawa, modernizacja, wymiana.

Zarządzanie eksploatacją w Polsce zasadza się na przepisach zawartych w Ramowej Instrukcji Eksploatacji Transformatorów, modernizowanej co kilka lat. Chociaż nie jest ona dokumentem obligatoryjnym, to jest bardzo często wykorzystywana przy opracowaniu szczegółowych instrukcji eksploatacji.

Transformatory różnią się konstrukcją, wiekiem i stanem eksploatacji, dlatego trudno sporządzić dla nich instrukcję o charakterze uniwersalnym.

Transformatory w eksploatacji wykazują oznaki zestarzenia izolacji i tendencje do zawilgocenia. Jednakże, ze względu na przewymiarowaną izolację papierową i nie wykorzystanie ciepłne, uzasadniona jest ich dalsza eksploatacja.

W transformatorach projektowanych i wytwarzanych współcześnie najczęściej:

- rozwijają się uszkodzenia wewnętrzne z powodu przegrzań i wyładowań niezupełnych (wnz), a także zupełnych,
- ulegają uszkodzeniom przełączniki zaczeptów pod obciążeniem,
- następują uszkodzenia izolatorów przepustowych w transformatorach najwyższych napięć,
- powstają zagrożenia związane z obecnością cząstek stałych w oleju [5].

W pracach [5] można znaleźć najbardziej znane techniki pomiarowe, konwencjonalne i będące w stadium rozwoju, stosowane w diagnostyce transformatorów, obejmujące skutki zakłóceń mechanicznych, termicznych i dielektrycznych.

W problematyce badań diagnostycznych istnieją także długoletnie doświadczenia polskie, prezentowane szczególnie na krajowych konferencjach transformatorowych.

#### **2.4.2.4. Proponowana tematyka badań w zakresie transformatorów**

Proponowana tematyka powinna uwzględniać krajowe możliwości badań.

W zakresie problematyki projektowej nasuwają się następujące propozycje.

1. Doskonalenie metod w zakresie obliczeń elektromagnetycznych, cieplnych i wytrzymałościowych struktur transformatorowych, obejmujących:
  - a) straty w rdzeniach zaplatanych jedno- i wieloramowych konwencjonalnych,
  - b) straty mocy w rdzeniach amorficznych,
  - c) straty mocy wskutek strumienia rozproszenia poza uzwojeniami,
  - d) obliczenia termiczne w warunkach chłodzenia naturalnego i wymuszonego,
  - e) przestrzenne naprężenia mechaniczne wskutek sił zwarciovych,
  - f) rozkłady pól stacjonarnych i udarowych w strukturach uzwojeń.
2. W zakresie technologii proponuje się:
  - a) nowe technologie wytwarzania izolacji elektrycznej twardej i miękkiej transformatorów,



- b) rozwój technologii w zakresie regeneracji olejów izolacyjnych oraz suszenia i impregnowania (zalewania) olejem części aktywnych transformatorów,
- c) nowe technologie transformatorów żywiczych (mniejszej mocy),
- d) technologie transformatorów wysokich częstotliwości dla energoelektroniki.

3. Proponowana problematyka eksploatacyjna nakierowana na monitoring:

- a) identyfikacja miejsc wyładowań niezupełnych,
- b) szybkie metody lokalizacji przegrzań rdzenia, uzwojeń i części konstrukcyjnych,
- c) skuteczne metody monitoringu izolatorów przepustowych najwyższych napięć,
- d) metody określenia dopuszczalnego zużycia elementów przełączników zaczeatów,
- e) monitoring drgań i hałasów wskazujących na uszkodzenia wewnętrzne transformatora,
- f) doskonalenie metod FRA (Frequency Response Analysis) pod względem czułości w badaniu wpływu zwarć na deformację uzwojeń,
- g) metody archiwizacji danych i korelacji zmian parametrów z poszczególnymi uszkodzeniami elementów transformatorów.

### Literatura

- [1] BERNATT J.: *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, Wyd. BOBRME Komel. 2010r.
- [2] DE ALMEIDA A. T., FONSECA P.: *Characterisation of EU Motor Use Energy Efficiency Improvements on Electric Motors and Drives*, Springer 2000.
- [3] DRAK B., GLINKA T., KAPINOS J., MIKSIEWICZ R., ZIENTEK P.: *Awaryjność maszyn elektrycznych i transformatorów w energetyce*, Wyd. przez Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. 2013r.
- [4] JEZIERSKI E., *Polskie osiągnięcia naukowo-techniczne w dziedzinie transformatorów w latach 1945-1963*, Przegląd Elektrotechniczny, RokXL (1964), nr 10, ss.421-425
- [5] KAŻMIERSKI M., OLECH W.: *Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów*. Wydawnictwo: Energopomiar-Elektryka Sp. z o. o., Gliwice 2013r.
- [6] METHA S. i inni, *Power transformers technology review and assessments*, Electra CIGRE February 2008( tłumaczenie na język polski w czasopiśmie Urządzenia dla energetyki Nr 4/2008, ss. 24-29)
- [7] ZAKRZEWSKI K., TOMCZUK B., KOTERAS D., *Simulation of forces and 3D field arising during power autotransformer fault due to electric arc in HV winding*, IEEE Transactions on magnetics, New York, USA, vol.38 No 2, March 2002, pp.1153-1156.

## 2.5 Trakcja Elektryczna i Napęd Elektryczny Pojazdów

Redakcja: naukowa: dr hab. inż. Adam Szeląg, prof. PW, Politechnika Warszawska.

Autorzy:

dr hab. inż. Krzysztof Karwowski, prof. PG, Politechnika Gdańska,

dr hab. inż. Grzegorz Skarpetowski, Politechnika Krakowska,

dr hab. inż. Adam Szeląg, prof. PW, Politechnika Warszawska.

Wstęp.

Polityka UE w zakresie transportu ma na celu:

- zwiększenie udziału transportu kolejowego w przewozach pasażerskich i towarowych (sprawny transport aglomeracyjny, szybki transport kolejowy),
- zmniejszenie zużycia energii i paliw płynnych w transporcie,
- zmniejszenie negatywnego oddziaływania środków i systemów transportu na środowisko (redukcja kosztów zewnętrznych, redukcja, emisja hałasu i zatłoczenia dróg),
- preferencyjne traktowanie rozwoju w kierunku zwiększenia udziału pojazdów trakcyjnych z napędem elektrycznym (sieciowego i autonomicznego).

### 2.5.1 Strategiczna rola trakcji elektrycznej

Trakcja elektryczna jest odmiennym, ale też bardziej ekologicznym i konkurencyjnym systemem transportowym w porównaniu z systemem drogowym. Należy zatem podjąć działania mające na celu powstrzymanie dalszego spadku przewozów kolejowych z wykorzystaniem trakcji elektrycznej. Istotne jest (poza zwiększeniem nakładów na trakcje elektryczną także różnymi innymi metodami, w tym administracyjnymi i fiskalnymi) dążenie do zwiększania wykorzystania istniejącej sieci transportu elektrycznego dla przewozów tak pasażerskich jak i towarowych. Udział kolei w Polsce w przewozach jest zbyt niski względem wskaźników wiodących krajów europejskich oraz wobec dużej długości funkcjonujących sieci kolei i trakcji miejskiej (co prawda nie zawsze odpowiedniej jakości). Zelektryfikowana komunikacja miejska ma jednak zdecydowaną przewagę nad transportem drogowym.

Strategiczna rola trakcji elektrycznej w Polsce wynika z:

- możliwości zapewnienia funkcjonowania gospodarki w warunkach braku dostaw paliw płynnych (energia elektryczna wytwarzana jest głównie z wydobywanego w Polsce węgla),

- dużej sieci zelektryfikowanych linii kolejowych (12000 km), pokrywających praktycznie, choć nierównomiernie cały kraj,
- zastosowania transportu elektrycznego w większości głównych miast w Polsce (poza Radomiem, Zieloną Górą, Rzeszowem, Białymstokiem i Kielcami),
- dość dobrze rozwiniętego (mimo likwidacji fabryk w latach 90-tych) polskiego przemysłu elektromaszynowego, co pozwala na produkcję prawie całego osprzętu potrzebnego do budowy układów zasilania i taboru dla kolei o prędkościach do 200 km/h, nie tylko na potrzeby krajowe, ale także zdolnego do konkurencji z wyrobami zachodnio-europejskimi,
- zastosowania w transporcie elektrycznym najnowszych technologii i rozwiązań będących wyzwaniem do rozwoju nauki i innowacji,
- ekologicznych aspektów transportu, co pozwala na wykorzystanie środków UE w rozwoju trakcji elektrycznej w następnej perspektywie budżetowej tj. praktycznie przez najbliższe 10 lat.

## 2.5.2 Trakcja sieciowa

### *Trakcja kolejowa.*

Górna sieć trakcyjna jest nadal najbardziej efektywnym sposobem dostarczania energii elektrycznej do pojazdów dużej mocy i prędkościach do 350 km/h. W odniesieniu do warunków kolei w Polsce oznacza to:

- zwiększenie wykorzystania istniejącego na 12000 km linii systemu zasilania DC 3 kV na liniach magistralnych do prędkości 160-200 km/h, a tam, gdzie jest to uzasadnione powyżej 200 km/h (linia CMK),
- prowadzenie badań i prac wdrożeniowych, przygotowujących kolei i przemysł w Polsce do perspektywnego wdrożenia systemu AC 2x25 kV/50 Hz – przede wszystkim dla nowych zastosowań w Polsce. Przesunięcie terminu realizacji nowych linii kolei dużych prędkości stwarza wyjątkową szansę na przeprowadzenie głębokich rodzimych studiów analitycznych usprawniających ten system i dających możliwość uniknięcia błędów popełnionych w przeszłości
- prowadzenie prac nad wdrożeniem systemu 25 kV nie tylko dla nowych linii kolei dużych prędkości, ale także dla linii dotychczas niezelektryfikowanych, a nie kolidujących z istniejącymi liniami zelektryfikowanymi w systemie 3 kV DC, czyli linii wydzielonych (np. LHS, odcinki linii przygranicznych

stykających się z liniami zelektryfikowanymi w systemie 25 kV, np. przy granicy z Litwą).

Wymaga to:

- wyprzedzającej o lata odpowiedniej rozbudowy sieci zasilających WN i NWN,
- zabezpieczenia źródeł mocy, zasilających te linie z odpowiednio rozbudowanej energetyki zawodowej,
- przygotowania produkcji aparatury i urządzeń wyposażenia systemu inii zasilających oraz podstacji trakcyjnych systemu 25 kV 50 Hz,
- przygotowania poligonu doświadczalnego (odcinek pilotażowy systemu 2x 25 kV 50Hz) na jednej z niezelektryfikowanych linii wymienionej we wcześniejszym punkcie,
- pobudzenia i wsparcia rodzimego przemysłu produkującego na potrzeby transportu kolejowego,
- opracowania rozwiązań technicznych, zapewniających separację odmiennych systemów zasilania w miejscach gdzie dochodzi do ich spotkania w celu wyeliminowania oddziaływań zakłócających.

Ze względu na wzrost mocy i prędkości pojazdów potrzebne są:

- nowe metody i rozwiązania do diagnostyki, monitoringu i eksploatacji podstacji trakcyjnych, sieci trakcyjnej i odbieraków prądu,
- opracowania i dopracowania konstrukcji różnych wariantów sieci trakcyjnych dla systemu 25 kV,
- wdrożenia nowych rozwiązań charakteryzujących się: zwiększoną obciążalnością, większą niezawodnością, mniejszą podatnością na oddziaływania środowiska (temperatura, opady, zanieczyszczenia), większą podatnością serwisową, odpornością na kradzieże i dewastacje,
- opracowania dot. metod separacji sieci trakcyjnej od sieci przemysłowej, w celu uniknięcia zbyt dużej asymetrii obciążenia sieci trójfazowej oraz zbyt dużego wzajemnego wpływu na siebie.

Typowym rozwiązaniem przejściowym będzie stosowanie relatywnie drogich pojazdów wielosystemowych (przystosowanych do prac przy różnych napięciach zasilania), a nawet hybrydowych (np. sieciowo-autonomiczne, kolejowo-tramwajowe). W trakcji pasażerskiej dominować będą pojazdy zespołowe.

Ze względu na znaczące zapotrzebowanie na energię elektryczną przez infrastrukturę kolejową obejmującą zasilanie układów bezpieczeństwa, sterowania i sygnalizacji istotne jest wdrażanie rozwiązań:

- podnoszących niezawodność i zapewniających odpowiednią jakość tego zasilania
- poprawiających jego odporność na różne zakłócenia, w tym zakłócenia środowiskowe
- zapewniających poprawną pracę w warunkach awaryjnych przez wykorzystanie własnych źródeł zasilania niekonwencjonalnego (np. z sieci trakcyjnej) lub zasilania autonomicznego (elektrownie wiatrowe, panele słoneczne, baterie akumulatorów czy też generatory prądotwórcze
- energooszczędnych (oświetlenie, ogrzewanie, urządzenia o wysokiej sprawności).

Trakcja elektryczna w komunikacji miejskiej.

W trakcji miejskiej dominująca będzie rola tramwaju, który w dużych aglomeracjach przyjmie formę tramwaju szybkiego lub metra.

W ostatnich latach obserwuje się wzrost inwestycji w tramwajowej komunikacji miejskiej. Świadczy o tym wzrost zainteresowania zakupem nowego lub modernizacją starego taboru tramwajowego. Prowadzi to do znacznego wzrostu obciążenia systemów zasilania, zwykle niezmodernizowanych – wywołany przez zamierzoną w tym rozwoju zwiększoną moc nowych układów napędowych, przewidzianych na sprostanie zwiększonej intensywności ruchu.

Nawet ograniczając się tylko do poprawy układów zasilania trakcji tramwajowej, trzeba prowadzić badania nad nowymi rozwiązaniami uwzględniającymi:

- nowe konfiguracje zasilania (np. zasilanie 2-stronne, analogiczne jak dla systemu kolejowego),
- wdrożenia do eksploatacji nowych typów sieci trakcyjnych o zwiększonym przekroju i obciążalności w celu podwyższenia zdolności przesyłowych, ponieważ nowoczesne układy napędowe pracują z hamowaniem odzyskowym a to wraz z zasilaniem na potrzeby trakcyjne i nietrakcyjne zwiększa średnie obciążenie termiczne przewodów linii zasilającej,
- możliwość zwiększenia wykorzystania energii hamowania odzyskowego poprzez magazynowanie energii elektrycznej (zasobniki: pojazdowe, stacyjne i sieciowe) i/lub jej zwrot do sieci trakcyjnej w celu wykorzystania

- przez inne pojazdy, lub przesłania do sieci elektroenergetycznej (za pośrednictwem energoelektronicznych przekształtników w podstacjach),
- wykorzystanie do ruchu odcinków bez zasilania – stosowanie pojazdów hybrydowych sieciowo-autonomicznych (praca na odcinku bez zasilania z górnej sieci jezdnej),
  - podniesienie napięcia zasilania sieci trakcyjnej do np. 1 kV w okresie kilkunastu lat, co pozwoli zmniejszyć straty przesyłu i prądy błądzące,
  - zasilanie bezstykowe na drodze indukcyjnej (punktowe lub liniowe bez górnej sieci jezdnej),
  - poprawę bezpieczeństwa, dyspozycyjności i podatności serwisowej układów zasilania, szczególnie w warunkach awaryjnych.

Istotne jest indywidualizowanie podejścia do rozwiązań stosowanych w komunikacji miejskiej i stosowanie odmiennych rozwiązań w systemach tramwajowych w dużych aglomeracjach (Warszawa, Łódź, Kraków) w porównaniu z miastami małymi (Elbląg, Grudziądz, Gorzów Wlkp.).

Komunikacja trolejbusowa, stosowana jest w znacznie mniejszej liczbie miast niż komunikacja tramwajowa. Dużo mniejsza moc układów napędowych trolejbusów ułatwia poszukiwanie rozwiązań przyszłościowych. Szczególne znaczenie mogą mieć tu nowe – wymagające dalszych prac badawczych systemy zasilania i magazynowania energii elektrycznej. Te nowe rozwiązania przyczynią się istotnie do rozwoju tej komunikacji i wzrostu jej mobilności.

Systemy metra będą rozwijać się powoli i dotychczas ich rozbudowa przewidziana jest jedynie w kilku polskich miastach. Następuje rozbudowa metra warszawskiego, ale ze względu na koszty budowy bierze się także pod uwagę rozwiązania tańsze – w formie szybkiego tramwaju o liniach znajdujących się tylko częściowo w tunelach lub wykopach, albo przebiegających po estakadach.

Rozważa się wykorzystanie do przewozów miejskich nieczynnych – będących w złym stanie technicznym – linii kolejowych (bocznic), które po rozbudowie lub remoncie powiązanych z elektryfikacją mogłyby stanowić uzupełnienie sieci transportu elektrycznego, niekiedy w formie pojazdów kolejowo-tramwajowych.

### *Trakcja podmiejska.*

W trakcji podmiejskiej może dojść do zastosowania pojazdów wielosystemowych, np. zasilanych z sieci tramwajowych jak i kolejowych, umożliwiających bezprzesiadkowe połączenie nawet dalekich osiedli podmiejskich z centrami miast

dzięki rozwiązaniom hybrydowym sieciowo autonomicznym z generatorem prądotwórczym i/lub zasobnikami energii (superkondensatory, akumulatory).

Przykładem takiego rozwiązania może być przygotowywana w najbliższym czasie zmiana systemu zasilania z 660 V DC na 3 kV DC na WKD. Ma ona poprawić wydolność transportową tego systemu o charakterze szybkiego tramwaju, tak znaczącego w obszarze podwarszawskim, mimo występujących aktualnie – a wymagających szybkiego rozwiązania – problemów ze zwiększonym zużyciem zestawów kołowych nowego dwusystemowego taboru.

Tendencje rozwojowe w komunikacji tramwajowej na świecie potwierdzają poprawność założeń komunikacyjnych opracowanych już ponad 100 lat temu w Łodzi. Przykładem może być Paryż i Zurych, gdzie buduje się nowe połączenia tramwajowe. Problemy komunikacyjne miejscowości podwarszawskich mogłyby rozwiązać wybudowanie linii tramwajowych w kierunku: Konstancina (przez Wilanów), Łomianek, Piaseczna, Janek, Marek.

### **2.5.3 Trakcja autonomiczna**

Źródła energii autonomicznych pojazdów z napędem elektrycznym.

Jako rozwojowe w dalszej perspektywie wydają się pojazdy z zasilaniem autonomicznym, np. z ogniwami paliwowymi, akumulatorami elektrochemicznymi i superkondensatorami. Dla pojazdów dużej mocy istotna pozostaje przekładnia spalinowo-elektryczna, podobnie do pracy manewrowej.

Wydajne (energia, moc, liczba cykli roboczych, bezpieczeństwo użytkowania) źródła energii elektrycznej są kluczowym problemem dla rozwoju autonomicznej trakcji miejskiej (tramwaje, trolejbusy, ebusy, samochody elektryczne). Wymaga to, oprócz rozwoju samych źródeł i zasobników, badań nad algorytmami sterowania i zarządzania przepływem energii pomiędzy źródłem, zasobnikami i napędem pojazdu.

Obwody główne pojazdów z napędem elektrycznym.

Nowoczesne napędy trakcyjne osiągnęły obecny poziom i mogą się dalej rozwijać przede wszystkim dzięki postępowi w energoelektronice. Impulsowe przekształcanie energii elektrycznej pozwala na dowolne sterowanie dopływem mocy do silników i kształtowanie charakterystyk trakcyjnych pojazdów odpowiednio do zapotrzebowania energetycznego dla danego typu pojazdu.

Dalszy rozwój przyrządów energoelektronicznych (np. na bazie węgla krzemu) wymagać będzie nowych metod sterowania napędów. Stosowane będą urządzenia o mniejszej masie, mniejszym zużyciu energii i wyższej sprawności takie jak:

- transformatory energoelektroniczne w pojazdach zasilanych z systemu AC zamiast klasycznych transformatorów (zmiana częstotliwości za pomocą przekształtników energoelektronicznych zmniejszy masę transformatora),
- przekształtniki o wyższej sprawności i mniejszych gabarytach,
- napędy sterowane indywidualnie (pojedyncze sterowanie momentem napędowym koła), co zwiększa przestrzeń wewnątrz i umożliwia konstrukcję pojazdów niskopodłogowych,
- silniki z z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi,
- nowoczesne układy automatyki i sterowania z oprogramowaniem zapewniającym wykorzystanie mocy zainstalowanych w pojazdach oraz podejmowanie decyzji w sytuacjach awaryjnych,
- rozwiązania zwiększające dyspozycyjność taboru dzięki wysokiej niezawodności i podatności serwisowej poprzez stosowanie rezerwowania istotnych urządzeń i diagnostyki predykcyjnej, pozwalającej na wymianę elementu zanim dojdzie do jego uszkodzenia, z systemami automatycznej informacji serwisowej zmniejszającej koszty eksploatacji,
- systemy transmisji momentu poprawiające współpracę koła z szyną, szybko wykrywające – dzięki dobrze działającym układom antypoślizgowym – sytuacje prowadzące do zwiększonego zużycia zestawów kołowych, co jest typowym problemem w produkowanym obecnie w Polsce taborze.

#### **2.5.4 Trakcja elektryczna a przemysł krajowy**

Stan techniczny krajowego przemysłu związanego z siecią trakcją elektryczną należy określić jako dobry. Istnieje duży potencjał w zakresie możliwości technicznych dotyczących zasilania 3 kV (podstacji i sieci trakcyjnych). Realizacja zasilania AC 25 kV/50 Hz, jeśli będzie poprzedzona skrupulatnymi, dobrze zorganizowanymi i koordynowanymi badaniami naukowymi i technicznymi – będzie możliwa do przeprowadzenia własnym wysiłkiem krajowym w ciągu najbliższych lat. Pojazdy różnych typów: lokomotywy, zespoły trakcyjne, tramwaje i trolejbusy produkowane są w Polsce jako opracowania własne lub przy współpracy z firmami zagranicznymi. Niektóre wysokotechnologiczne podzespoły muszą jeszcze chwilowo być kupowane za granicą.



Zastosowanie elektrycznych układów napędowych w budowie pojazdów samochodowych znajduje się obecnie jeszcze na etapie prób i błędów. Opracowania są rozproszone. Produkowane są krótkie serie różnych typów pojazdów (o małym stopniu zaawansowania technologicznego).

Jest prawdopodobne, że zwiększenie inwestycji w obszarze trakcji elektrycznej – poczynając od badań, poprzez wdrożenia i produkcję przemysłową, dla której zapewniono by zbyt w kraju – dałoby szansę, oprócz rozwoju infrastruktury i ekologicznego transportu w Polsce, na uzyskanie przez ten przemysł (pracujący na potrzeby transportu) wręcz marki przemysłu narodowego. Do tego niezbędne są jednak dobrze przygotowane i wyposażone zespoły badawcze z wysokim wykształceniem naukowo-technicznym.

### **2.5.5 Preferowane kierunki badań w Polsce**

Preferowane kierunki prac i badań w Polsce dotyczyć powinny:

1. Zmniejszenia zużycia energii.
2. Zmiany w konstrukcji i wyposażeniu taboru.
3. Zmniejszenia strat przetwarzania i przesyłu energii w układzie zasilania i taborze.
4. Efektywnego wykorzystania energii hamowania odzyskowego (zasobniki energii).
5. Opracowania systemu rozliczeń za energię na potrzeby trakcyjne i nietrakcyjne.
6. Wprowadzenia preferencji dla operatorów systemów transportu elektrycznego wdrażających rozwiązania energooszczędne (np. możliwości wprowadzenia certyfikatów za zmniejszenie zużycia energii i wykorzystanie energii hamowania odzyskowego).
7. Poprawy niezawodności funkcjonowania transportu elektrycznego.
8. Wprowadzania rozwiązań proekologicznych i wpisanych w politykę zrównoważonego rozwoju (hałas, emisja zanieczyszczeń, obniżka kosztów zewnętrznych transportu).
9. Poprawy konkurencyjności transportu elektrycznego.
10. Efektywnych i bezpiecznych źródeł energii dla pojazdów autonomicznych.

### *Preferowane kierunki prac na kolei.*

Preferowane kierunki prac na kolei powinny dotyczyć:

- modernizacji istniejących układów zasilania kolejowego w systemie 3 kV DC ze względu na jego niewydolność energetyczną w stosunku do mocy nowoczesnych pojazdów, zbyt małą moc podstacji trakcyjnych i ich przestrzenne rozmieszczenie (nowe metody analiz, diagnostyka, poprawa niezawodności, wyszukiwanie wąskich gardeł). Wyniki takich prac pozwolą na optymalizację działań, skrócenie okresu modernizacji i zapewnią kompatybilność subsystemów na styku: układ zasilania-tabor),
- prac nad rozwojem Kolei Dużych Prędkości śladami tendencji rozwoju komunikacji światowej. Należy prowadzić prace przygotowawcze w celu perspektywicznego wdrożenia system zasilania AC 25 kV/50 Hz (układy zasilania w tym systemie, obszary stykowe DC-AC, tabor wielosystemowy),
- interoperacyjności kolei i wdrożenia wymagań Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności i Pakietu Kolejowego wynikającego z Dyrektyw UE.

### *Preferowane kierunki prac w obszarze komunikacji miejskiej/podmiejskiej.*

Istotne problemy stojące przed komunikacją miejską mogą być rozwiązane przez:

- opracowanie metod analiz i projektowania w celu zapewnienie kompatybilności zwykle wysłużonego układu zasilania z nowym taborom przy minimalizacji kosztów modernizacji i eksploatacji,
- zmniejszenie zużycia energii poprzez wykorzystanie energii hamowania odzyskowego pojazdów, a także przez inteligentne energooszczędne sterowanie napędem,
- zapewnienie niezawodności i bezpieczeństwa systemu tramwajowego,
- opracowanie technologii ładowania (stykowego i bezstykowego) pojazdów elektrycznych (samochody i autobusy elektryczne).

### *Literatura*

- [1] Polityka Transportowa Państwa 2006 – 2025. *Ministerstwo Infrastruktury*. Warszawa, 2005
- [2] WACH A., *Zagadnienia kształcenia w zakresie związanym z trakcją elektryczną na poziomie szkoły wyższej w aspekcie potrzeb przedsiębiorstwa PKP*. Seminarium Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej nt. kształcenia kadr w zakresie inżynierii elektrycznej. 2000
- [3] MIKULSKI J., *Kształcenie kadr na poziomie wyższym (inżynierskim) w dziedzinie transportu, ze szczególnym uwzględnieniem automatyki kolejowej*. Seminarium Automatyki i Telekomunikacji

- [4] Materiały zespołu ds. kształcenia kadr (przewodniczący: prof. H. Bałuch) Rady Naukowej Kolei Dużych Prędkości przy PKP PLK SA.
- [5] Materiały ogólnodostępne prasy technicznej i na stronach internetowych poszczególnych instytucji
- [6] SZELAĞ A., *Problemy procesu projektowania układów zasilania linii kolejowych*. Międzynarodowa Konferencja N-T „Problemy projektowania i budowy systemu zasilania sieci trakcyjnej Kolei Dużych Prędkości”, Krzyżowa, 19-21 XI 2009
- [7] SZELAĞ A., *Problemy kształcenia i zatrudniania specjalistów z zakresu inżynierii elektrycznej w transporcie*. Materiały Konferencji „90 lat nauczania trakcji elektrycznej w Politechnice Warszawskiej”, Warszawa 24 IX 2010r.
- [8] MACIOŁEK T., SZELAĞ A., *Elektroenergetyka trakcyjna linii kolejowych w Polsce - uwagi dotyczące procesu projektowania*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2012, nr 7-8, s. 30-37.

## 2.6 Energoelektronika i Napęd Elektryczny.

*Redakcja: naukowa i autorstwo: prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg, Akademia Górniczo Hutnicza.*

### 2.6.1 Krótka diagnoza stanu

Automatyka napędu elektrycznego i energoelektronika rozwijała się w Polsce bardzo dynamicznie w latach 70. i 80. minionego stulecia. Efektem tego były m.in. systemy napędowe dla górniczych maszyn wyciągowych i dla walcarek w hutnictwie „Jantar” opracowane w AGH, systemy ISUE i TUN opracowane w Politechnice Warszawskiej i Instytucie Elektrotechniki w Międzyzlesiu. W latach tych wykonano wiele prac badawczych, które były wdrożone takich jak napędy dla tramwaju, kompensatory mocy biernej, napędy lokomotywek górniczych, napędy pomp i wentylatorów, wiele specjalizowanych napędów dla przemysłu. Prace te odpowiadały na ówczesne potrzeby gospodarki. Potrzeby te powodowały, że rozwinął się wtedy krajowy przemysł produkujący urządzenia energoelektroniczne. Do tej pory z powodzeniem eksploatowane są urządzenia energoelektroniczne wyprodukowane przez Eltę w Łodzi, Apator w Toruniu, Elektromontaż nr 2 w Krakowie Nowej Hucie i innych.

Po zmianach ustrojowych – w latach 90. ubiegłego wieku, w wyniku których nastąpiły zmiany właścicielskie przy jednocześnie następującej w tym czasie rewolucyjnej wręcz zmianie technologicznej ( tranzystor IGBT i MOSFET) nastąpiło załamanie krajowego przemysłu energoelektronicznego i rozpoczął się czas importu urządzeń. Spowodowało to upadek biur projektów i zanik badań prowadzących do wdrożeń prowadzonych w ośrodkach akademickich. Jednocześnie brak istotnego finansowania z przemysłu spowodował, że zaplecze badawcze przestało nadążać za tendencjami światowymi. Dopiero w ostatnim dziesięcioleciu zaczęły powstawać

nowe podmioty gospodarcze nastawione nie tylko na import urządzeń lub ich montaż, ale również na prowadzenie badań w Polsce.

Obecnie przemysł wytwarzający i instalujący przekształtniki energoelektroniczne w większości reprezentowany jest przez wielkie koncerny międzynarodowe, takie jak ABB, WoodWord. Powstało kilka nowych niszowych firm krajowych nastawionych głównie na obsługę jednostkowych trudnych lub rzadko występujących zamówień nieopłacalnych dla wielkich wytwórców (np. Termetal z Piekar Śląskich projektujący produkujący na indywidualne zamówienie falownikowe nagrzewnice indukcyjne dużej mocy lub Toruński Twerd coraz skuteczniej specjalizujący się w produkcji falowników dla specjalnych zastosowań).

Innym kierunkiem rozwoju energoelektroniki i napędu elektrycznego są firmy „spin-off” jak np. kierowana przez prof. Zbigniewa Krzemińskiego Drives Sp. z o. o. założona w roku 2004 przez pracowników i doktorantów Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej lub ENEL-PC, Sp. z o.o w Gliwicach. Wymienione firmy nie są jedynymi, a wymienione zostały tylko dla ilustracji.

Zmiany sposobu finansowania nauki (bardzo niski poziom płac, szczególnie młodych pracowników, w odniesieniu do płac pracowników niskowyzkwalifikowanych w gospodarce), a przede wszystkim sposób oceny pracowników naukowo badawczych „za publikacyjny urobek punktowy” nie zachęca do prowadzenia trudnych i w realny sposób weryfikowanych badań stosowanych i wdrożeniowych. Stan ten nie powoduje ssania talentów (słabo wykształconych z powodu zapaści szkolnictwa średniego i obowiązkowego dwustopniowego systemu studiów) do pracy naukowej.

## **2.6.2 Stan obecny i trendy rozwojowe**

Energoelektronika i automatyka napędu elektrycznego obsługuje praktycznie wszystkie obszary produkcji, dystrybucji i użytkowanie energii elektrycznej.

Aktualne obszary rozwijanych aplikacji to:

1. Przekształcanie energii pozyskiwanej z odnawialnych źródeł (elektrownie wiatrowe, fotowoltaika, gospodarka wodorowa i ogniwa paliwowe):
  - a) przekształtniki dc/dc,
  - b) układy energoelektroniczne do obsługi generatorów wiatrowych dużej mocy wykorzystujących generatory synchroniczne o magnesach trwałych (PMSG) lub generatory na bazie maszyn dwustronnie zasilanych (DFIM)

- c) falowniki 1- i 3- fazowe do przekazywania energii do sieci prądu przemiennego,
  - d) mikrokonwertery dla mikroźródeł (pojedyncze panele PV, małe elektrownie wiatrowe).
2. Systemy lokalnej dystrybucji energii pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych za pomocą sieci prądu stałego.
  3. Komercyjny przesył energii prądem stałym.
  4. Napędy elektronarzędzi i urządzeń gospodarstwa domowego z zastosowaniem trójfazowych silników indukcyjnych, reluktancyjnych lub maszyn o magnesach trwałych.
  5. Serwosilniki i nastawniki dla automatyki.
  6. Układy napędowe bezczujnikowe (estymacja położenia, prędkości i momentu).
  7. Obsługa energooszczędnych źródeł światła (lampy LED, świetlówki kompaktowe).
  8. Urządzenia grzewcze dla przemysłu i dla medycyny.
  9. Układy kompensacji mocy biernej i filtracji aktywnej indywidualnej i centralnej.
  10. Napędy trakcyjne i napędy pojazdów indywidualnych:
    - a) napędy trakcji miejskiej (tramwaj, metro, trolejbus) z zastosowaniem maszyn prądu przemiennego zasilanych przez wysokosprawne, niezawodne przekształtniki energoelektroniczne dc/ac,
    - b) dwukierunkowe stacje miejskich przekształtników trakcyjnych (dla zapewnienia odzysku energii hamujących pojazdów),
    - c) samochód elektryczny jako element miejskiego transportu indywidualnego oraz jako konsument i magazyn energii odnawialnych ,
    - d) energoelektronika w wyposażeniu samochodu,
    - e) nieduże pojazdy, najczęściej 2 lub 3 kołowe, przeznaczone do celów rekreacyjnych lub transportu osób (w tym o ograniczonych zdolnościach ruchowych) a także zaopatrzenia na małych odległościach z napędem elektrycznym głównym lub tylko wspomagającym napęd realizowany za pomocą pedałów.
  11. Energooszczędne napędy urządzeń technologicznych dużych mocy (górnictwo, hutnictwo, przemysł przetwórczy) z zastosowaniem maszyn indukcyjnych i maszyn o magnesach trwałych.

12. Działania prowadzące do minimalizacji gabarytów i masy, a tym samym kosztów produkcji urządzeń energoelektronicznych poprzez zastosowanie nowych przyrządów półprzewodnikowych umożliwiających stosowanie wyższych częstotliwości impulsowania (SiC, GaN).
13. Systemy magazynowania energii:
- dla ograniczenia wahań mocy w lokalnych układach odbiorczych,
  - magazynowania nadwyżek energii pozyskiwanych z odnawialnych źródeł,
  - krótkotrwałego magazynowania energii uzyskiwanej z odzyskowego hamowania napędów (np. intensywnie eksploatowane windy),
  - zasobniki superkondensatorowe i zasobniki wirujące (szybko- i wolnoobrotowe).
14. Systemy bezstykowego przesyłu energii na małe odległości:
- bezstykowe zasilanie pojazdów szynowych (bezstykowy odbierak),
  - układy dla ładowania akumulatorów samochodu elektrycznego,
  - układy dla technologii zagrożonych wybuchem (np. górnictwo) lub zalaniem,
  - układy małej mocy dla urządzeń AGD, RTV, itp.
15. Transformatory „inteligentne” – trójfazowe układy energoelektroniczne pracujące przy wysokiej częstotliwości (trójfazowy dwukierunkowy układ ac/dc – jednofazowy dwukierunkowy układ dc/ac wysokiej częstotliwości).
16. Napędy transportu poziomego i pionowego w górnictwie.

### **2.6.3 Kierunki badań wynikające z aktualnej polityki UE**

Aktualna polityka UE zmierza do:

- Zwiększenia udziału energii odnawialnej w gospodarce.
- Tworzenia systemów prosumenckich.
- Oszczędnego gospodarowania energią i surowcami.
- Poprawy komfortu życia.
- Ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczenia środowiska.
- Minimalizacji gabarytów i masy, a tym samym kosztów produkcji urządzeń energoelektronicznych poprzez zastosowanie nowych przyrządów

półprzewodnikowych (SiC, GaN), materiałów magnetycznych i kondensatorów umożliwiających stosowanie wyższych częstotliwości impulsowania.

Wymaga to prac nad:

- nowymi algorytmami sterowania i regulacji,
- nowymi topologiami układów o miękkiej komutacji,
- nowymi algorytmami detekcji uszkodzeń łączników energoelektronicznych i czujników pomiarowych oraz metodami kompensacji tych uszkodzeń,
- stosowaniem układów wbudowanych (embedded systems, system-on-chip SoC) zawierających układy FPGA lub ASIC do sterowania i regulacji,
- topologiami i algorytmami układów „niskobudżetowych”,
- nowymi materiałami magnetycznymi,
- konstrukcją elementów elektromagnetycznych dla układów podwyższonej częstotliwości (ograniczenie pojemności pasożytniczych, skutków efektu naskórkowego),
- kondensatorami o dużej obciążalności impulsowej i małej stratności,
- ograniczeniem zakłóceń elektromagnetycznych
- ciągłym monitoringiem pracy urządzeń (a w szczególności stanów awaryjnych) i skuteczną transmisją danych do ośrodków kontroli i nadzoru.

#### **2.6.4 Preferowane kierunki prac i badań w Polsce**

1. Zmniejszenie zużycia energii elektrycznej.
2. Efektywne pozyskiwanie i przekształcanie energii ze źródeł odnawialnych.
3. Poprawa jakości energii elektrycznej (zmniejszenie negatywnego oddziaływania odbiorników, kompensacja mocy biernej i filtracja w indywidualna oraz w węzłach systemu).
4. Nowe konstrukcje silników, w szczególności silników wysokoobrotowych, silników wolnoobrotowych do napędów bezpośrednich, w tym silników o magnesach trwałych, silników wysokosprawnych.
5. Nowe topologie przekształtników dla zmniejszenia strat (układy miękkiego łączenia).
6. Systemy smart grid i systemy prosumenckie.

7. Zwiększenie czasu niezawodnej pracy urządzeń energoelektronicznych (topologie i algorytmy sterowania do eliminacji lub znacznego ograniczenia stosowania kondensatorów elektrolitycznych).
8. Zwiększenie niezawodności układów o specjalnych wymaganiach w zakresie zapewnienie ciągłości działania ze względów bezpieczeństwa na drodze rozwoju struktur i algorytmów sterowania odpornych na uszkodzenia (Fault tolerant control).

## 2.7 Elektrotermia i Technika Świetlna

*Redakcja: naukowa: prof. dr hab. inż. Mieczysław Hering, Politechnika Warszawska.*

*Autorzy*

*Prof. dr hab. inż. Wojciech Żagan, Politechnika Warszawska,*

*dr hab. inż. Piotr Pracki, Politechnika Warszawska.*

### 2.7.1 Elektrotermia. Wprowadzenie

Elektrotermia jest działem nauki i techniki zajmującym się przemianami energii elektrycznej w ciepło dla celów użytkowych. Pozyskiwane w ten sposób ciepło wykorzystywane jest w przeważającej liczbie obszarów działalności człowieka, a głównie w procesach technologicznych i w ogrzewnictwie, czyli w celu zapewnienia organizmom żywym, obiektom, przedmiotom stanu cieplnego korygującego warunki klimatyczne. W ostatnich latach obserwuje się także wzrost zastosowań urządzeń elektrotermicznych w gospodarstwach domowych na przykład przez coraz szersze stosowanie kuchni indukcyjnych. Trudno obecnie wskazać aplikację wymagającą dostarczenia ciepła, której nie można byłoby zrealizować z użyciem energii elektrycznej. Głównymi czynnikami limitującymi ekspansję elektrotermii są: podaż energii elektrycznej i jej cena, która według aktualnych prognoz będzie wzrastać do roku 2030, lecz w mniejszym i bardziej przewidywalnym stopniu niż inne nośniki energii. Dlatego też udział metod elektrotermicznych w generacji ciepła do celów technologicznych i ogrzewniczych nieprzerwanie rośnie. Czynnikiem decydującym o tym jest wiele, lecz najbardziej istotnymi są: ewidentnie korzystny wpływ elektrotermii na rozwój przemysłów średniej i wysokiej techniki, zdolnych do konkurencji oraz rosnące wymogi w zakresie ochrony środowiska i zdrowia człowieka. Techniki elektrotermiczne jeszcze bardziej wiążą się z wprowadzaniem tzw. „technologii przełomów”, co musi skutkować masową wymianą dotychczas stosowanych technologii przemysłowych, ekspansją przemysłu proekologicznego, a także z odejściem od tradycyjnych i nie ekologicznych systemów ogrzewniczych.



## **2.7.2 Tendencje światowe**

Są one w istotnym stopniu podporządkowane strategii globalizacji gospodarki. Zmiany związane z tą strategią czyli reindustrializacja obejmuje przebudowę struktury gałęziowej praktycznie wszystkich najistotniejszych z punktu widzenia zastosowań elektrotermii przemysłów, zmiany w ich rozmieszczeniu i stopniu koncentracji oraz zmiany w organizacji i wielkości przedsiębiorstw. W ramach restrukturyzacji stopniowo modernizowane są całe ciągi technologiczne, a także eliminowane liczne gałęzie przemysłu i zastępowane przemysłami nowoczesnymi. Zwykle dzieje się to z dużym udziałem środków finansowych i kadry specjalistów z krajów najwyżej rozwiniętych gospodarczo. Powoduje to w konsekwencji tworzenie zagranicznych filii przedsiębiorstw macierzystych, a rozproszone po całym świecie zagraniczne ich oddziały zajmują się produkcją i dystrybucją towarów. Tego rodzaju praktyka sprzyja rozwojowi małych i średnich przedsiębiorstw, w których łatwiej o ciągłe i szybkie unowocześnianie produkcji niż w dużych zakładach.

Na tego rodzaju tendencje mają wpływ głównie trzy kategorie czynników o charakterze: technologicznym, ekonomicznym i ekologicznym. Czynniki o charakterze technologicznym obejmują m.in. wprowadzanie energooszczędnych ciągów technologicznych, bezodpadowych technologii produkcji, wielokrotne wykorzystywanie tego samego surowca, a także w pewnych obszarach miniaturyzację produkcji. Czynniki ekonomiczne wynikają w szczególności z wyczerpywania się złóż paliw i surowców łatwych i tanich w eksploatacji, z poszukiwania najtańszej siły roboczej, z korzystnej dla inwestorów polityki podatkowej. Czynniki ekologiczne wiążą się z koniecznością eliminacji przemysłów, a także zastosowań pozaprzemysłowych o dużym degradującym wpływie na środowisko.

Biorąc to pod uwagę w dalszym ciągu przedstawione zostaną perspektywiczne zadania badawcze w Polsce osadzone w obserwowanych trendach światowych, którym można nadać status preferowanych z uwagi na ich rangę określoną globalnym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, wpływem na środowisko oraz determinujące procesy technologiczne wysokiego poziomu.

## **2.7.3 Perspektywiczne zadania badawcze w Polsce**

### *Elektrostalownictwo.*

Z uwagi na skalę produkcji oraz zużycie energii elektrycznej elektrostalownictwo stanowi jeden z najważniejszych działów elektrotermii. Poziom produkcji stali

w piecach elektrycznych w Polsce osiągnął 50% całkowitej produkcji tego metalu i nadal szybko rośnie. Wykorzystuje się do tego celu piece łukowe. Najważniejszym zadaniem badawczym jest współdziałanie z metalurgami w celu opracowania takich technologii, które pod względem energetycznym zbliżą się do swoich limitów termodynamicznych z jednoczesnym spełnieniem standardów BAT. Zadania badawcze z tego wynikające lokują się w obszarach związanych z:

- Celowością wprowadzenie stalowniczych urządzeń łukowych na prąd stały.
- Racjonalizacją budowy i modelowania systemów zasilania wielkiej mocy: prostowników sterowanych, filtrów, kompensatorów.
- Modelowaniem komputerowym układów i procesów mieszania kąpieli: kondukcyjnego w piecach łukowych prądu stałego, indukcyjnego w piecach łukowych prądu przemiennego oraz jeziora ciekłego metalu w krystalizatorze podczas ciągłego odlewania stali.
- Opracowaniem nowych drażonych elektrod grafitowych wypełnionych różnymi dodatkami i zastosowaniem pokryć ograniczających utlenianie elektrod.
- Intensyfikacją wstępnego podgrzewania wsadu stałego, stosowaniem wsadu ciekłego oraz gorących peletów DRI (żelaza gąbczastego).
- Optymalizacją procesów piecowych z zastosowaniem sztucznej inteligencji.
- Komputerowym sterowaniem procesami wytapiania i zużyciem energii elektrycznej w piecach łukowych wytopowych oraz w metalurgii pozapiecowej w oparciu o zintegrowany system sterowania procesami stalowniczymi.
- Optymalizacją wskaźnika PUTU (Power Utilization and Time Utilization) wyrażającego czas wytopu w stosunku do mocy doprowadzanej do pieca.
- Zastosowaniem mikrofal do przygotowania wsadu metalicznego i innych dodatków w celu poprawy bilansów zużycia energii elektrycznej.
- Rozwojem metod termowizyjnych i laserowych do kontroli stanu i pracy agregatów metalurgicznych.
- Modelowaniem komputerowym, symulacją i automatycznym sterowaniem procesami w metalurgii pozapiecowej (MP) oraz w systemach COS.
- Wprowadzeniem on-line kontroli i sterowania wykańczaniem i rafinacją w MP.

Produkcja stali ze złomu stalowego zamiast z pierwotnej rudy zmniejsza nakłady energii o około 75 % i pozwala zaoszczędzić 90 % surowców do jej produkcji. Maksymalizacja ilości stali produkowanej ze złomu jest więc uzasadniona ekonomicznie, a za takim rozwiązaniem przemawiają również względy ochrony środowiska (redukcja zanieczyszczenia powietrza o około (86 %), zużycia wody (40 %), zanieczyszczenia wody (76 %) oraz odpadów górniczych (97 %)). Produkcji jednej tony stali ze złomu odpowiada emisja CO<sub>2</sub> i jest o 231 ton mniejsza niż w przypadku produkcji z pierwotnej rudy. Produkty uboczne produkcji stali (np. żużel) są niemal w pełni wykorzystywane.

### *Elektrometalurgia żelazostopów.*

Spośród żelazostopów w Polsce najistotniejsze znaczenie ma wytwarzanie żelazokrzemu realizowane w piecach łukowo-rezystancyjnych. Jest to proces wysoce energochłonny z potencjalnymi możliwościami dalszego ograniczenia zużycia właściwego energii elektrycznej (koszty energii elektrycznej w procesie produkcyjnym przekraczają 50% kosztów produkcji). Zadania badawcze w tym obszarze wiążą się z następującymi celami produkcyjnymi i ekonomicznymi:

- Zwiększenie zdolności produkcyjnych istniejących pieców, w tym zwiększenie sprawności procesu poprzez optymalizację procesu technologicznego, wdrażanie systemów informatycznych wspomagających sterowanie procesem, oraz dalsze udoskonalanie procesu.
- Wytworzenie energii elektrycznej z ciepła odpadowych gazów poprocesowych oraz energii cieplnej w postaci wody użytkowej, a tym samym poprawienie efektywności energetycznej procesu.
- Badania związane z emisją SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> i doprowadzenie technologii do kategorii BAT.
- Badania dotyczące możliwości ograniczenia emisji węglowodorów poprzez zastąpienia węgla kamiennego półkoksem.

### *Odlewnictwo.*

Odlewnictwo jest gałęzią techniki, w której elektrotermia jest obecna głównie poprzez piece indukcyjne i łukowe i w mniejszym stopniu poprzez piece rezystancyjne oraz indukcyjno – plazmowe i łukowo-plazmowe oraz urządzenia magnetohydrodynamiczne wykorzystywane w transporcie i dozowaniu ciekłych metali. Udział Polski w produkcji odlewów wynosi 14% w skali świata. Zajmujemy 8

miejsce w Europie w produkcji odlewów ze stopów żelaza, 5 –w produkcji odlewów ze stopów metali nieżelaznych. Wytwarzamy odlewy z żeliwa szarego (48%), sferoidalnego (15%), staliwa (5%), aluminium (30%) i z innym materiałów nieżelaznych (2%). W 2013 r. wyprodukowano 1 mln to odlewów. W kraju czynnych jest 450 odlewni. Uważa się, że Polska zajmuje dobrą pozycję na rynku odlewniczym, a sektor ten uznawany jest za rozwojowy. Utrzymanie tej tendencji jest możliwe wyłącznie przy opanowaniu i rozwijaniu produkcji skomplikowanych odlewów o wysokich parametrach jakościowych z jednoczesną zaawansowaną automatyzacją i informatyzacją procesów technologicznych. Wymaga to również zmian organizacyjnych sektora w kierunku konsolidacji małych podmiotów.

Jednym z zasadniczych kierunków osiągnięcia tych celów jest istotne zwiększenie udziału pieców elektrycznych w procesach odlewniczych, a w szczególności indukcyjnych tyglowych i kanałowych oraz specjalizowanych urządzeń wykorzystywanych w technologiach stało-ciekłych. Ten trend jest skutkiem wprowadzania technologii innowacyjnych, w których zwykle piece elektryczne są urządzeniami wyłącznymi. Wynika to zarówno z ogromnych walorów tych urządzeń o charakterze technologicznym, a także ekologicznym. Obecnie za wskaźnik nowoczesności przemysłu odlewniczego uważa się udział w nim pieców elektrycznych w procesach topienia. Biorąc pod uwagę aktualną sytuację w zakresie produkcji urządzeń elektrotermicznych dla potrzeb odlewnictwa, doświadczenia i możliwości krajowych placówek badawczych w zakresie ich wdrażania oraz potencjał naukowo-badawczy w obszarze elektrotermii ukierunkowanej na potrzeby tej gałęzi techniki, kształtują się następujące obszary badań, które mają potencjał przyniesienia najwyższych korzyści gospodarczych i społecznych.

- Wprowadzanie do odlewni pieców indukcyjnych do topienia średniej częstotliwości z tyrystorowymi przemiennikami częstotliwości najnowszej generacji.
- Rozwój procesów duplex: żeliwiak-piec indukcyjny.
- Komputeryzacja nowo instalowanych i eksploatowanych indukcyjnych pieców tyglowych topiących i pieców kanałowych.
- Racjonalizacja równoległej pracy pieców indukcyjnych.
- Koordynacja współpracy wytapialni z formiarnią w celu obniżenia zużycia właściwego energii przez piece indukcyjne.
- Odzysk ciepła z wentylacji pieców indukcyjnych, z wody chłodzącej i wykorzystanie ciepła odpadowego do suszenia złomu.

- Intensyfikacja wprowadzanie pieców indukcyjnych do odlewania precyzyjnego metodą odśrodkową w próżni.
- Intensyfikacja wprowadzania pieców indukcyjnych we współpracy z piecami kanałowymi w celu ograniczenia zużycia energii na wytapianie żeliwa.
- Odlewanie żeliwa, metali nieżelaznych i kompozytów ze wspomaganie elektromagnetycznym.
- Urządzenia indukcyjne do wytwarzania stopów metodą lewitacji oraz semi-lewitacji elektromagnetycznej, na przykład przez wykorzystanie w tym celu pieców indukcyjnych z zimnym tygłem.
- Badania procesu mieszania elektromagnetycznego w różnych procesach technologicznych: topienia metali, ciągłego odlewania, tiki-stopowego odlewania ciągłego stopów metali nieżelaznych i stopów żelaza.
- Rozwój pomp, rynien i dozowników elektromagnetycznych w procesach odlewania stopów metali nieżelaznych z zastosowaniem ciśnienia hydrostatycznego, pionowego pod wysokim ciśnieniem, pod niskim ciśnieniem, z przeciwcisnieniem.
- Badania w zakresie konstrukcji nagrzewnic indukcyjnych do tiki-stopowania w procesach odlewnictwa stopów magnezu.
- Badania nad techniką topienia plazmowego i plazmowo-indukcyjnego.
- Wykorzystanie urządzeń elektrotermicznych w metrologii, w tym do pomiaru natężenia przepływu.
- Zastosowanie pieców indukcyjnych do topienia materiałów o niewielkiej przewodności, w tym między innymi do topienia szkła.

Elektrotermia w przemyśle maszynowym, spożywczym, tekstylnym oraz środków transportu i w medycynie.

Łatwość sterowania rozkładami w czasie i przestrzeni przemian energii elektrycznej w ciepło stała się podstawą wytwarzania wyrobów o dużej trwałości (wydłużonej żywotności), wysokiej precyzji wykonania, zminiaturyzowanych, stanowiących podstawę nanotechnologii. Jednocześnie nowe urządzenia elektrotermiczne i realizowane w nich technologie zwykle charakteryzują się wysoką wydajnością, energooszczędnością, małą ilością defektów i odpadów. Ze względu na wyszczególnione możliwości technologiczne i zalety ekonomiczne już w obecnym stanie techniki urządzenia tej kategorii coraz częściej uznawane są za bezalternatywne, zwłaszcza w przemyśle maszynowym, spożywczym, tekstylnym,

środków transportu i medycynie. W najbliższej i dalekiej perspektywie urządzenia elektrotermiczne traktowane będą jako najłatwiej poddające się modernizacji przez wprowadzanie komputeryzacji, robotyzacji, diagnostyki i monitoringu.

Za najważniejsze cele badawcze z tego obszaru należy uznać:

- Opracowanie urządzeń do obróbki jarzeniowej warstw wierzchnich części maszyn o złożonej geometrii w warunkach próżni dynamicznej.
- Komputerowe wspomaganie projektowania procesów indukcyjnego hartowania powierzchniowego części maszyn, w tym szczególnie dla potrzeb przemysłu samochodowego i lotniczego.
- Opracowanie technik indukcyjnego nagrzewania wirujących walców dla potrzeb przemysłu papierniczego i włókienniczego.
- Zwiększenie sprawności nagrzewnic indukcyjnych przez wykorzystanie magnesów trwałych
- Technologie indukcyjnego nagrzewania objętościowego metali żelaznych i nieżelaznych w procesach obróbki plastycznej.
- Konstrukcja i badania źródeł zasilania systemów wielowzбудnikowych i wieloczęstotliwościowych do nagrzewania indukcyjnego w procesach wytwarzania monokryształów, a w szczególności węgla krzemu.
- Systemy pomiarowo-symulacyjne do identyfikacji i weryfikacji charakterystyk temperaturowych elektrycznych i cieplnych parametrów materiałowych wsadów.
- Konstrukcje „inteligentnych” falowników do nagrzewania indukcyjnego o dużej elastyczności impedancyjnego dopasowywania się do obciążenia.
- Konstrukcje falowników dwuczęstotliwościowych mocy do nagrzewania indukcyjnego o dużych zakresach zmian częstotliwości i wysokich sprawnościach.
- Oparte o bazę wiedzy systemy regulacji pola temperatury przy nagrzewaniu indukcyjnym.
- Wykorzystanie technik sztucznej inteligencji w projektowaniu urządzeń i technologii elektrotermicznych.
- Monitorowanie i wizualizacja procesów elektrotermicznych z wykorzystaniem algorytmów rozpoznawania obrazu.

- Wykorzystanie metod nanotermicznych w różnych terapiach medycznych, w tym stosowanie metod hipertermii, wykorzystanie urządzeń elektrotermicznych w procesach diagnostyki, wspomaganie tradycyjnych metod leczenia oraz prowadzenie badań w obszarze leczenia nowotworów.

*Elektrotermiczne techniki obróbki odpadów trudnoobrabialnych.*

Elektrotermia była i jest wykorzystywana w procesach zmniejszenia obciążenia środowiska różnymi odpadami, np. złomem stalowym, lecz tego rodzaju procesy zaliczają się do odzyskowych jako alternatywnych dla nieelektrycznych procesów wytwórczych. Współcześnie rozwijany nowy obszar zastosowań elektrotermii, polega na neutralizacji i degradacji trudno obrabialnych odpadów przemysłowych (także radioaktywnych) i komunalnych, a w tym bezpośrednio w miejscu ich występowania (in situ), co ma istotne znaczenie w obróbce gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi, zwłaszcza w obszarach wyłączanych z użytkowania obiektów przemysłowych. Celami badawczymi, w wielu przypadkach w kraju już wstępnie podejmowanymi, z wyraźnymi perspektywami komercjalizacji wyników są:

Neutralizacja silnie skażonej ziemi poprzez jej wityfikację in situ metodą rezystancyjno-elektrodową.

Wityfikacja popiołów i żużli pochodzących ze spalania odpadów komunalnych w wysokotemperaturowych piecach rezystancyjno-elektrodowych, ukierunkowana m.in. na rozkład dioxyn i związaną z masą szklaną metali ciężkich.

Niszczenie techniką łukową toksycznych substancji organicznych, destrukcja oraz redukcja ich objętości w stopniu pozwalającym na złagodzenie wymagań w zakresie składowania odpadów lub separację i recykling surowców.

Obróbka w piecach łukowych pyłów zawierających duże ilości cynku, a pochodzących ze stalowniczych pieców łukowych przerabiających złom samochodowy.

Obróbka w kąpeli metalowej o temperaturze 1600<sup>0</sup>C odpadów będących źródłem dużych ilości dioxyn i furanów w tandemie piec indukcyjny – reaktor wylewny.

Wstępna mikrofalowa obróbka nieczystości szpitalnych, pochodzących z przychodni, laboratoriów przed ich transportem do spalarni typu przemysłowego.

Zastosowanie technik plazmowych w krakingu termicznym łańcuchów molekuł szkodliwych substancji organicznych, w wityfikacji substancji toksycznych, obróbce odpadów radioaktywnych o niskim i średnim poziomie radioaktywności.

### *Ogrzewnictwo elektryczne.*

Problematyka ogrzewania elektrycznego, m.in. jako alternatywy dla rozwiązań tradycyjnych opartych w szczególności na paliwach stałych staje się w Polsce problemem niezwykle aktualnym z uwagi na spodziewane wprowadzenie za dwa lata dyrektywy unijnej, która skutkować musi dużym ograniczeniem bądź całkowitą eliminacją pieców węglowych. Na dopłaty do wymiany tych pieców rząd rezerwuje ok. 5 mld zł ze środków budżetowych i unijnych. Niewątpliwie znaczna część pieców węglowych zastąpiona zostanie układami ogrzewania elektrycznego, stąd też problematyka ta nabiera niezwyklej aktualności. W grupie problemów, które są mniej rozeznane i wymagają podjęcia badań, wyodrębnić można następujące tematy.

Badania nad nowymi rozwiązaniami układów ogrzewania elektrycznego w systemach zasilania lokalnego.

Układy ogrzewania elektrycznego w domach pasywnych.

Metody programowania całkowicie zautomatyzowanych układów ogrzewania elektrycznego.

Skojarzone układy ogrzewania pompy ciepła – ogrzewacze bezpośrednie.

Metody analizy efektywności energetycznej elektrycznych układów grzewczych w warunkach komfortu cieplnego.

Metody symulacji ogrzewania promiennikowego pomieszczeń wielkokubatorowych dla potrzeb projektowania układów grzewczych.

#### **2.7.4 Elektrotermia w krajowej strategii inteligentnej specjalizacji**

W opracowanym na zlecenie Ministerstwa Gospodarki w ramach działania: Wdrażanie wyników oraz rekomendacji wynikających z projektu Foresight technologiczny *przemysłu InSight2030* mającym umożliwić wskazanie przyszłych kierunków rozwoju na podstawie obecnego stanu wiedzy w zakresie nauki, technologii i świadomości społecznej, elektrotermia występuje w kilku polach badawczych. Foresight technologiczny umożliwia łączenie interesów naukowców w poszukiwaniu najbardziej obiecujących możliwości badań z potrzebami przemysłu oraz społeczeństwa w zakresie nowych technologii i innowacji. W wyniku rozwijających się trendów technologicznych oraz rosnących kosztów rozwoju badań i technologii, nie jest możliwe finansowanie wszystkich badań i technologii. Przyjęto zatem, że istnieje potrzeba większej selektywności, prowadzącej do sformułowania przejrzystej polityki oraz jaśniejszych priorytetów z zakresu badań i technologii [1].



W konsekwencji niezbędne jest dokonanie wyborów poprzez zastosowanie bardziej systematycznej procedury ustalania priorytetów w odniesieniu do technologii badań. Oznacza to, że pewne istotne obszary elektrotermii zostały zaliczone do kategorii kluczowych technologii przyszłości. Już po konsultacjach i weryfikacji wyników projektu *InSight2030* w nowej liście technologii elektrotermia lokuje się:

- w Polu Badawczym PB 2 – Nanotechnologie (Technologia: Nanowarstwy ochronne metaliczne, ceramiczne i diamentopodobne);
- w Polu Badawczym 5 – Technologie mikroelektroniczne (Technologie oparte na wykorzystaniu węgliku krzemu);
- w Polu Badawczym 7 – Technologie kogeneracji i racjonalizacji gospodarowania energią (Technologia: Energooszczędne systemy grzewcze i przygotowania ciepłej wody użytkowej w obszarze zintegrowanych systemów grzewczych oraz energooszczędnych AGD oraz Technologie urządzeń elektrotermicznych o wysokiej sprawności).

Zidentyfikowane jako najbardziej konkurencyjne, o kluczowym znaczeniu dla rozwoju przemysłu technologie i obszary będą stanowić podstawę do opracowania *Programu wdrażania wyników projektu InSight2030*, zostaną uwzględnione w *Programie Rozwoju Przedsiębiorstw* (dokumencie wykonawczym do Strategii Innowacyjności i Efektywności Gospodarki) przygotowywanym przez Ministerstwo Gospodarki, a także posłużą do określenia strategii inteligentnej specjalizacji (*Smart Specialisation Strategy - S3*), będącej podstawą dla opracowania nowej perspektywy finansowej na lata 2014-2020.

### **2.7.5 Technika Świetlna. Wprowadzenie**

Technika świetlna zajmuje się wytwarzaniem, formowaniem rozsyłu, pomiarami i wykorzystaniem światła, a także szerszymi zagadnieniami odnoszącymi się do promieniowania optycznego. Ze względu na swój interdyscyplinarny charakter obejmuje swoim zakresem szerokie spektrum zagadnień na pograniczu m.in. fizyki, chemii, elektryki, optoelektroniki, energetyki, materiałoznawstwa, architektury i psychologii.

Grupy tematyczne techniki świetlnej:

- Psychofizjologia widzenia.
- Źródła światła.

- Sprzęt oświetleniowy.
- Technika oświetlania.
- Fotometria i kolorymetria.
- Fotobiologia i fotochemia.
- Światło i zdrowie.
- Iluminacja obiektów.
- Światło w multimediami i grafice komputerowej.
- Światło w transporcie i sygnalizacja świetlna.

### **2.7.6 Stan techniki świetlnej w Polsce w roku 2014**

Należy zdawać sobie sprawę z ograniczonych możliwości rozwoju badań podstawowych w Polsce z obszaru wytwarzania światła. Jest to domena krajów wysokorozwiniętych a ulokowanie badań w dużych koncernach oświetleniowych stanowi potwierdzenie tego punktu widzenia. Zatem pomijając tę sferę badawczą, wszelkie inne, a szczególnie badania i prace naukowe o charakterze aplikacyjnym mają dużą szansę zaistnienia w Polsce.

Nowa era źródeł światła wywołała całą lawinę potrzeb badawczych poczynając od kwestii psychologii widzenia, zagrożeń fotobiologicznych poprzez potrzebę innego, szerszego spojrzenia na kwestię oślnienia aż do szerokiego spektrum zagadnień aplikacyjnych, w tym m.in. zmiany myślenia o oprawach oświetleniowych, o ich konstrukcji, eksploatacji, badaniach. Wprowadzenie do powszechnego użytku źródeł elektroluminescencyjnych stworzyło nową szansę urzeczywistnienia idei oświetlenia dynamicznego, dostosowanego do chwilowych potrzeb, do rytmów okołodobowych człowieka. Pojawiające się inne, śmiałe, dotychczas nierealne pomysły innego wykorzystania światła w oświetleniu ulicznym i w sygnalizacji świetlnej. Źródła elektroluminescencyjne, będąc źródłami o wysokim poziomie rozwiązań technologicznych, stwarzają potrzebę badań w kierunku opanowania zagadnień eksploatacyjnych, chłodzenia, sterowania itp.

Perspektywa badawcza w obrębie techniki świetlnej w Polsce, określona na stan z roku 2014, to racjonalne wprowadzanie do użytku elektroluminescencyjnych źródeł światła, bez uszczerbku dla jakości widzenia i bezpieczeństwa, z wykorzystaniem wszystkich zalet tych źródeł w sferze energooszczędności, ochrony środowiska itp.

Nie można też rysować perspektywy badań z zakresu techniki świetlnej w Polsce bez odniesienia do infrastruktury badawczej – instytucji naukowych i kadry

pracowników naukowych reprezentujących technikę świetlną. Obecnie w Polsce w dziedzinie techniki świetlnej jest aktywnych około 40 – 50 osób rozlokowanych tematycznie w różnych obszarach techniki świetlnej. Od strony instytucjonalnej nie ma w Polsce żadnej instytucji naukowej powołanej w celu prowadzenia badań w zakresie techniki świetlnej. Specjalność ta znalazła swoje organizacyjne ramy w postaci zakładu naukowego na Politechnice Warszawskiej, Politechnice Poznańskiej i Politechnice Białostockiej, a także zespołów lub osób na Politechnikach Łódzkiej, Świętokrzyskiej i Rzeszowskiej. Podobnie umocowany jest organizacyjnie zespół pracowników zajmujących się techniką świetlną samochodową w Instytucie Transportu Samochodowego oraz w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy PIB w Pracowni Promieniowania Optycznego. Rozwój naukowy kadry dokonuje się głównie w oparciu o wspomniane wyżej uczelnie a tempo tego rozwoju to 1 – 2 prace doktorskie rocznie i 1 rozprawa habilitacyjna na 2 lata. Obecna kadra naukowa zajmująca się badaniami w obszarze techniki świetlnej pokrywa swoimi zainteresowaniami znaczną, choć nie pełną powierzchnię tematyki techniki świetlnej.

Prowadzone są prace naukowe, ale także i techniczne, w zakresie techniki oświetlania (efektywność energetyczna, iluminacja obiektów), oświetlenie drogowe, osprzęt oświetleniowy (metody projektowania i prace konstrukcyjne w zakresie opraw oświetleniowych), w zakresie ochrony przed promieniowaniem optycznym, w zakresie oświetleniowych aspektów grafiki komputerowej, badań spektro- i kolorymetrycznych nowych źródeł światła, w zakresie techniki rejestrowania i przetwarzania obrazów oświetlanych obiektów i źródeł światła.

Biorąc pod uwagę obecny stan kadrowy, istniejącą infrastrukturę, tendencje rozwojowe oraz indywidualne zainteresowania pracowników naukowych reprezentujących tę specjalność należy stwierdzić, że w perspektywie najbliższych 5 - 10 lat utrzyma się bądź nawet rozwinię zainteresowanie tematyką techniki świetlnej. Napawa optymizmem, w kontekście rozwoju badań naukowych, duże zainteresowanie młodzieży studiującej tematykę techniki świetlnej. Szacuje się, że corocznie dyplom inżyniera lub magistra inżyniera albo dyplom ukończenia studiów podyplomowych obszarze techniki świetlnej uzyskuje około 70 – 90 osób.

Naturalnym obszarem tematycznym rozwoju techniki świetlnej (w Polsce i na świecie) jest technika multimedialna. Dziś trudno jest wyrokować, czy tematyka ta poszerzy tradycyjny zakres techniki świetlnej czy też stanie się samodzielną specjalnością. Widać jest na pewno już dziś potrzebą poszerzenia techniki świetlnej w kierunków multimediiów, jak również dostrzega się potrzebę odwrotną wkroczenia techniki świetlnej do multimediiów. To połączenie, przenikanie tematyczne obu obszarów badawczych i tematycznych stanowi nowe, dziś jeszcze nie do końca

zdefiniowane i zamocowane problemy badawcze. Widać też ogromną potrzebę rynku zatrudniania specjalistów przygotowanych w obszarze multimedialnych.

### **2.7.7 Tendencje światowe w technice świetlnej**

Dzisiejsze tendencje światowe w zakresie techniki świetlnej osadzają się na nowych źródłach światła jakie zostały wprowadzone do użytku jako kolejna generacja technologii wytwarzania światła. Mowa tu o źródłach elektroluminescencyjnych, czyli o tzw. LED-ach. Pojawienie się tego źródła zmieniło myślenie o technice świetlnej i to zarówno w obszarze zagadnień podstawowych dotyczących badań nad psychofizjologią widzenia, przededefiniowania uznanych dotąd pojęć i wielkości jak również w obszarze rozwiązań sprzętowych, które wynikają z odmiennych cech tych nowych źródeł światła. LED-y wymuszają odejście od tradycyjnych rozwiązań opraw oświetleniowych i od tradycyjnego oświetlenia. Tak więc LED jako źródło światła ze specyficznym rozkładem widmowym, ze specyficzną potrzebą traktowania bryły świecącej jako zbioru punktów świetlnych, ze specyficzną półprzestrzenną bryłą fotometryczną stworzyły nowy obszar badawczy dla aplikacji. Wysoka luminancja tych źródeł światła wymaga odnowienia badań nad olśnieniem, głównie olśnieniem przykrym. Źródło LED i oprawy LED wymagają innych metod pomiaru bryły fotometrycznej i strumienia świetlnego. Wymuszają potrzebę badań jednorodności barwnej. Z drugiej strony musi zostać przededefiniowane dotychczasowe rozumienie pojęcia trwałości użytecznej i bezwzględnej tego źródła, którego okres życia zależy trwałości pojedynczego chipu.

Badania naukowe w obrębie techniki świetlnej, w związku z pojawieniem się LED-ów zobowiązują oświetleniowców do weryfikacji i chłodnej oceny rzeczywistych cech tych źródeł i możliwości aplikacyjnych, szczególnie wobec wielkiego szumu informacyjnego i marketingowego, który został wytworzony wokół tego, bez wątpienia nowatorskiego źródła. Obszar badań naukowych z zakresu techniki świetlnej poszerzył się i rozwija w kierunku kształtowania rozkładu widmowego źródeł promieniowania a także w kierunku coraz bardziej inteligentnych systemów dynamicznego sterowania oświetleniem, które te źródła umożliwiają. Reasumując, tendencje światowe w zakresie badań w technice świetlnej koncentrują się wokół uporządkowania i usystematyzowania wiedzy oraz zweryfikowania możliwości i potrzeb aplikacyjnych oraz zaproponowania nowych obszarów.

Jako trend światowy w badaniach poświęconych technice świetlnej należy uznać próby budowania systemów oświetlenia inteligentnego prowadzącego do wyższego poziomu zaspakajania potrzeb na światło i oświetlenie z jednoczesnym ograniczaniem zużycia energii. Trzeba tu wspomnieć o systemach inteligentnego sterowania i zarządzania oświetleniem zewnętrznym. Nie można zapomnieć o adaptacyjnych

systemach oświetlenia samochodowego i sygnalizacji świetlnej. Dzisiejsza era rozwoju źródeł światła i systemów sterowania pozwala na szersze badania i realizację potrzeb człowieka określonych jako preferencje użytkownika w zakresie wyboru barwy światła, poziomu oświetlenia itp.

W zakresie badań nad energooszczędnością dostrzega się rozwój badań i prac teoretycznych poświęconych efektywności energetycznej oświetlenia. Dotyczy to coraz większych obszarów aplikacyjnych. Ważną rolą nauki jest tu wskazywanie dróg prowadzących ku energooszczędności ale bez zmniejszania jakości oświetlenia i konieczności realizacji różnych potrzeb użytkowników.

Bez wątplenia tendencją światową w zakresie oświetlenia są prace rozwojowe nad nowymi technologiami wytwarzania światła. Należy się spodziewać, że zapowiadana, nowa generacja źródeł elektroluminescencyjnych (OLED) w najbliższym czasie, podobnie jak to miało miejsce w przypadku LED-ów, stanie się nowym impulsem do rozwoju techniki świetlnej, do badań nad aplikacyjnością, do przełamywania barier naukowych.

### **2.7.8 Perspektywiczne zadania badawcze z techniki świetlnej w Polsce**

1. Aplikacje LED-ów i OLED-ów w oświetleniu, iluminacji, sygnalizacji, aparaturze kontrolno-pomiarowej i medycznej.
2. Nowe materiały i konstrukcje w technologii źródeł światła i opraw oświetleniowych.
3. Modelowanie i badania źródeł światła, opraw oświetleniowych i systemów sterowania oświetleniem.
4. Kształtowanie bryły fotometrycznej opraw oświetleniowych i projektowanie ich układów regulacji pod kątem oświetlenia i sterowania oświetleniem w obiektach.
5. Konstrukcje i zastosowanie elementów optoelektronicznych w technice świetlnej.
6. Konstrukcje systemów pozyskiwania energii promieniowania słonecznego do wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej, wykorzystywanej w oświetleniu.
7. Projektowanie i badania hybrydowych systemów oświetleniowych.
8. Zagadnienia cieplne w tym ich modelowanie w sprzęcie oświetleniowym.
9. Kształtowanie wizerunku miasta w następstwie iluminacji obiektów – rozwój teorii master planu oświetlenia miast.

10. Oświetleniowe aspekty bezpieczeństwa ruchu drogowego.
11. Badanie i ocena zagrożeń powodowanych przez światło przeszkadzające w oświetleniu zewnętrznym.
12. Wykorzystanie światła dziennego w oświetleniu.
13. Badanie parametrów oświetleniowych pod kątem jakości otoczenia świetlnego.
14. Badanie promieniowania optycznego (światła) i jego wpływu na wydolność wzrokową, odczucia, emocje, nastrój, zachowanie oraz zagrożenie dla ludzi.
15. Badanie wpływu światła na rozwój dzieci, utrzymanie aktywności i motywacji do pracy u pracowników zmian nocnych, występowanie okulistycznych chorób wieku starszego i funkcjonowanie siatkówki oka.
16. Wykorzystanie nowoczesnych technik obrazowania i elementów wirtualnej rzeczywistości w analizie wpływu scen świetlnych i projekcji audiowizualnych na organizm ludzki.
17. Modelowanie i badania źródeł światła, opraw oświetleniowych i systemów sterowania oświetleniem pod kątem ich wpływu na jakość energii elektrycznej
18. Badanie efektywności energetycznej i ekonomicznej rozwiązań oświetleniowych.
19. Badania eksploatacyjne oświetlenia
20. Estetyka oświetlenia, symulacje komputerowe oświetlenia, mapping, animacje i wizualizacje świetlne.
21. Metody pomiarów i konstrukcje przyrządów do pomiarów promieniowania VIS, UV i IR.
22. Nowe metody sprawdzania przyrządów pomiarowych stosowanych do obiektywnej oceny cech fizycznych korelujących z postrzeganiem wzrokowym.
23. Fotometria cyfrowa – nowe wyzwania i możliwości, aplikacje matryc detektorów w aparaturze kontrolno pomiarowej z zakresu techniki świetlnej.
24. Pomiary barwy i kształtowanie rozkładu widmowego promieniowania źródeł światła w następstwie mieszania barw.
25. Światłowodowe i optyczne czujniki wielkości elektrycznych i nieelektrycznych.

#### Literatura

- [1] Ministerstwo Gospodarki: *Forsight technologiczny przemysłu – InSight20130: aktualizacja wyników oraz krajowa strategia inteligentnej specjalizacji (smart specialization)*, Warszawa, Grudzień 2012 r

### **3. Kształcenie wykwalifikowanych kadr na kierunku Elektrotechnika**

*Redakcja naukowa: prof. dr inż. Stanisław Bolkowski, Politechnika Warszawska,  
dr hab. inż. Adam Szeląg, prof. PW, Politechnika Warszawska.*

W przygotowaniu rozdziału 3 wykorzystano materiały i uwagi merytoryczne dostarczone przez członków KE, w szczególności Przewodniczących Sekcji: Teorii Elektrotechniki, Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego, Materiałów i Technologii Elektrotechnicznych, Trakcji Elektrycznej, Wielkich Mocy i Wysokich Napięć.

#### **3.1 Umiejscowienie kierunku ELEKTROTECHNIKA w obszarze kształcenia**

Kierunek Elektrotechnika należy do obszaru kształcenia w zakresie nauk technicznych i jest powiązany z takimi kierunkami studiów jak Automatyka i robotyka, Energetyka, Elektronika i telekomunikacja oraz Informatyka.

##### **3.1.1 Cel ogólny kształcenia**

###### **a) I stopień**

Przygotowanie studenta do pracy w obszarze szeroko rozumianej elektrotechniki; przygotowanie do samodzielnego korzystania z nabytej wiedzy i umiejętności; wykształcenie umiejętności samodzielnego myślenia w sposób abstrakcyjny i rozwiązywania problemów inżynierskich; przygotowanie do pracy indywidualnej i zespołowej; zdobycie podstawowej wiedzy z zakresu projektowania, konstruowania i eksploatacji urządzeń i systemów elektrycznych z wykorzystaniem narzędzi informatycznych; absolwent jest przygotowany do podjęcia pracy w zakładach przemysłowych oraz biurach konstrukcyjnych i projektowych związanych z szeroko rozumianą inżynierią elektryczną i dziedzinami pokrewnymi; absolwent jest przygotowany do podjęcia studiów drugiego stopnia.

###### **b) II stopień**

Przygotowanie studenta do samodzielnego korzystania z nabytej wiedzy i umiejętności oraz nadzorowania pracy innych; podniesienie poziomu zaawansowania umiejętności samodzielnego myślenia i rozwiązywania problemów technicznych i naukowo-badawczych z zakresu inżynierii elektrycznej. Absolwent posiada zaawansowaną i ugruntowaną wiedzę z zakresu projektowania, konstruowania, funkcjonowania i testowania urządzeń elektrycznych oraz komputerowych systemów pomiarowych i systemów sterowania cyfrowego. Posiada umiejętności stosowania właściwych narzędzi informatycznych i elektronicznych. Jest zdolny do pracy twórczej oraz do podejmowania decyzji i kierowania zespołami pracowniczymi. Jest przygotowany do podjęcia studiów trzeciego stopnia (doktoranckich).

### **3.1.2 Ocena aktualnie realizowanych studiów dwustopniowych**

Teza podstawowa: Poziom absolwentów kształconych na kierunku elektrotechnika na studiach dwustopniowych w ostatnich latach obniżył się. Dotyczy to zarówno pierwszego jak i drugiego stopnia.

Wpłynęły na to następujące czynniki:

a.) Nowa matura i z tym związany brak egzaminu wstępnego na studia.

Powszechna jest w środowisku uczelni opinia, że po wprowadzeniu nowej matury i nowych programów kształcenia obniżył się poziom absolwentów szkół średnich zwłaszcza z przedmiotów takich jak matematyka i fizyka. Kandydaci na studia techniczne mają ogromne braki z tych przedmiotów. Dopiero po wprowadzeniu od kilku lat obowiązkowej matury z matematyki sytuacja nieco poprawiła się, ale nadal nie jest zadowalająca.

Negatywnie na poziom kształcenia wpływa także przygotowywanie uczniów szkół średnich przede wszystkim do egzaminów w formie testów. Studenci mają problem z przygotowaniem w sposób logiczny i zrozumiały dla odbiorcy dłuższej wypowiedzi pisemnej, ujawnia się to zwykle przy pisaniu pracy dyplomowej.

b.) Wprowadzenie studiów dwustopniowych.

Studia dwustopniowe mają szereg wad.

W czasie siedmiu semestrów bardzo trudno wykształcić inżyniera. W pierwszych latach studenci kształcą się przede wszystkim teoretycznie, a na kształcenie inżynierskie zostają zasadniczo 1-2 semestry. Egzamin dyplomowy stał się fikcją, gdyż studenci nie mają dość czasu żeby przygotować się, nie mówiąc o napisaniu pracy dyplomowej, która często staje się (z konieczności) rozszerzonym projektem.

**c.) Malejąca z roku na rok dotacja budżetowa dla uczelni.**

Wobec malejących środków na dydaktykę podejmowane są różne, przeważnie szkodliwe, działania. Ogranicza się liczbę godzin na zajęcia laboratoryjne. Z roku na rok wzrasta liczba studentów przypadająca na jednego nauczyciela akademickiego prowadzącego zajęcia laboratoryjne. Zmniejszyła się głównie liczba godzin przeznaczonych na laboratoria typu pomiarowego, a kontakt ze stanowiskiem pomiarowym często sprowadza się do stanowisk wirtualnych (symulacje komputerowe).

d.) Przy prowadzonych ocenach pracowników naukowo-dydaktycznych, zwłaszcza przy awansach, w małym stopniu brana jest pod uwagę działalność dydaktyczna.



W szkolnictwie wyższym pracownik naukowo-dydaktyczny jest oceniany głównie z punktu widzenia dorobku naukowego (liczą się punkty za publikacje w czasopiśmie określonych przez Ministerstwo i z listy JCR), a w mniejszym stopniu aplikacje i wdrożenia, które w dziedzinach inżynierskich stanowią przecież treść i cel kształcenia oraz służą gospodarce kraju, a nie tylko statystykom porównawczym takim jak ocena punktowa. Nie uwzględnia się w ocenie pracy naukowej autorstwa podręczników akademickich, w napisanie których trzeba włożyć dużo wysiłku i wykorzystać wiedzę z dziedziny naukowej autora.

**d.) Zbyt mało jest praktyk przeddyplomowych i dyplomowych w czasie studiów.**

Praktyki zawodowe odgrywają ważną rolę w procesie kształcenia, zwłaszcza na pierwszym stopniu studiów. Występują znaczne trudności z pozyskaniem miejsc w przemyśle na praktyki dla studentów. Wynika to m. in. z niewielkiej współpracy uczelni z przemysłem i skupianiu się kadry nie na wdrożeniach dla przemysłu, a na gromadzeniu punktów za publikacje. Brak jest praktyki przeddyplomowej jako obowiązkowej na II stopniu kształcenia.

**e.) Niskie płace, a co za tym idzie, podejmowanie przez nauczycieli akademickich dodatkowego zatrudnienia -wieloletowość.**

Poziom płac w szkolnictwie wyższym (mimo ostatnich podwyżek) jest żenująco niski, szczególnie dla młodszej kadry. Trudno się dziwić, że w tej sytuacji pracownicy uczelni podejmują różne prace dodatkowe, zwykle nie są to prace pożyteczne z punktu widzenia rozwoju naukowego. Skutkuje to m.in. brakiem chętnych do pisania podręczników i skryptów, brakiem czasu dla studenta, ograniczeniem możliwości rozwoju i odtworzenia kadry.

**f.) Niezbyt prawidłowo stosowany system ECTS przy rejestracji.**

System punktów ECTS może być dobrym narzędziem do rejestracji, jeśli jest dobrze i konsekwentnie prowadzony. Nie można przyporządkować punktów poszczególnym przedmiotom tylko na podstawie liczby godzin w programie studiów. Często nie jest brana pod uwagę sekwencja zaliczeń poszczególnych przedmiotów. Zbyt nisko ustawiany jest procentowy próg decydujący o zaliczeniu roku, zwłaszcza pierwszego roku.

### **3.2 Podsumowanie dotyczące edukacji w zakresie elektrotechniki**

Ważnym zadaniem dla uczelni jest wypracowanie i wdrożenie konkretnych planów dotyczących modyfikacji edukacji w zakresie elektrotechniki. Widoczna luka pokoleniowa w polskich szkołach wyższych sprawia, iż wiele zagadnień związanych z elektrotechniką zniknęło z programów nauczania, stąd bardzo duże zagrożenie dla egzystencji wielu specjalności. Konsekwencją tego stanu jest zamykanie kosztownych specjalistycznych laboratoriów dydaktyczno-badawczych. Tego typu nieodwracalne posunięcia mają poważne skutki w postaci zaniku badań eksperymentalnych, braku uczestnictwa w tworzeniu nowych innowacyjnych koncepcji, obniżeniu poziomu publikacji (ze względu na konieczność 'zbierania punktów' naukowcy skupiają się na zdecydowanie łatwiejszych i publikacyjnie szybszych w przygotowaniu pracach teoretycznych i symulacyjnych). Stąd priorytetowym krokiem wydaje się stworzenie planu utrzymania i reaktywacji laboratoriów „elektrotechnicznych” w polskich szkołach wyższych, bez których prowadzenie rzeczywistych badań naukowych i dydaktyki na wysokim poziomie jest niemożliwe. Dlatego utrzymanie i rozbudowa laboratoriów badawczych i dydaktycznych na wyższych uczelniach powinny być objęte programem szczególnej troski przez Komitet Elektrotechniki PAN.

Wskazane jest stworzenie uregulowań prawnych dla współpracy przemysłu i uczelni. Dobrym posunięciem w tym kierunku mogłoby być utworzenie fundowanych przez przemysł tematów i bazy laboratoryjnej na uczelniach, tak jak to ma miejsce od wielu lat w krajach Europy Zachodniej. Zatrudnienie, na część etatu odpowiedniej osoby, pracującej w przemyśle lub w przemysłowej instytucji badawczej, spowoduje z jednej strony naturalne sprzężenie zwrotne, wprowadzając możliwość realizacji tematów aplikacyjnych, a z drugiej strony prowadzenie wykładów z praktycznymi przykładami, czy wręcz naturalną możliwość zatrudnienia dla przyszłych absolwentów w przemyśle. Niestety, wymogi formalne utrudniają wykorzystanie w dydaktyce specjalistów spoza uczelni.

Przemysł potrzebuje absolwentów studiów inżynierskich, którzy posiadają odpowiednią i aktualną wiedzę techniczną, niezbędną do rozwiązywania zadań w praktyce zawodowej tak aby sprostać nowym wyzwaniom i konkurencji.

Poważnym problemem dla utrzymania potencjału dydaktycznego wyższych uczelni technicznych kształcących na kierunku „elektrotechnika” będzie niewątpliwie nadchodzący w najbliższych latach niż demograficzny. Środkiem zaradczym może być zmiana sposobu kształcenia i powrót do prowadzenia zajęć dydaktycznych w mniejszych grupach problemowo-projektowych, nastawionych na intensywną pracę i oraz rozwój nowych specjalizacji. Na pewno konieczne jest w tym obszarze

nakreślenie pewnej dalekosiężnej perspektywy, z uwzględnieniem realnych prognoz ludnościowych oraz przyszłych potrzeb gospodarki.

Ważne jest rozszerzenie sfery oddziaływania pracowników naukowych na studentów i utrzymanie zanikających relacji mistrz-uczeń. Bazą dla tej działalności są koła naukowe, organizowane studenckie sesje naukowe, udział studentów w pracach badawczych, organizacji sympozjów i konferencji, a także staże studenckie wsparte stypendiami oraz na zasadzie wolontariatu.

Reforma szkolnictwa podstawowego i średniego spowodowała zanik zawodowego szkolnictwa średniego. Wywołało to m.in. zwiększone zapotrzebowanie na inżynierów. Ze względu na zmianę systemu studiów wyższych na tzw. Proces Boloński (I stopień inżynierski, II – magisterski i III – doktorski) kształceni są studenci w systemie dwustopniowym. Wskutek niedostatecznego nauczania matematyki i dość powszechnych studiów inżynierskich panuje opinia o spadku jakości kształcenia. Dwustopniowe studia zawodowe – jak dotychczas – charakteryzują się obniżeniem poziomu prac magisterskich względem studiów jednolitych magisterskich. Zmiana systemu szkolnictwa wyższego, oraz pogoń za obniżeniem kosztów kształcenia, spowodowały likwidację kierunków dyplomowania.

Program nauczania studentów na kierunku 'elektrotechnika' w specjalnościach związanych z przetwarzaniem i użytkowaniem energii (maszyny elektryczne, napęd elektryczny, energoelektronika, trakcja elektryczna, elektrotermia, materiałoznawstwo, wysokie napięcia, elektroenergetyka) powinien w szczególności obejmować zagadnienia specjalistyczne. Wprowadzenie do programów nauczania wiedzy o aktualnych tendencjach w rozwoju elektrotechniki w szczególności w elektroenergetyce, energoelektronice i transporcie oraz o związanych z nimi aplikacjach informatycznych. Absolwenci tych specjalności powinni poza wiedzą teoretyczną przejść dobre szkolenie laboratoryjne, wykonać projekt i zrealizować na jego podstawie działający model urządzenia lub układu. Kształcenie wymaga zmiany struktury studiów nastawionej na indywidualizm na rzecz kształcenia pracy zespołowej oraz przeznaczenia pewnych środków na materiały, podzespoły i usługi dla realizacji projektów i prac dyplomowych. Magister inżynier elektryk – pracujący na potrzeby przedsiębiorstw przemysłowych i eksploatacji staje się coraz częściej nie tylko specjalistą technicznym o szerokich horyzontach, ale również managerem, organizatorem, negocjatorem, handlowcem.

Wchodzący na rynek absolwenci szkół wyższych powinni posiadać również wiedzę w zakresie prawa, posługiwać się językami obcymi oraz być przygotowani do rozwiązywania – poza technicznymi – zagadnień finansowo-prawnych i organizacyjnych.

Przy teoretycznie większej samodzielności uczelni, które mogą kształtować własne programy i metody kształcenia, (np. niekoniecznie systemy punktowe rozliczane w cyklach rocznych itp.) powinny one uwzględniać duży zasób wiedzy podstawowej umożliwiającej absolwentowi permanentne kształcenie się w miarę obserwowanego gwałtownego rozwoju techniki.

Zasadniczo podział na studia I-szego i II-giego stopnia ten trend podkreśla. Dlatego studia I-szego stopnia 'inżynierskie' powinny mieć większy udział przedmiotów specjalistycznych i aplikacyjnych. Na II-gim stopniu z kolei ponownie pojawiają się przedmioty ogólne i brak jest miejsca na zaawansowane kształcenie w specjalności. Wymusza to konieczność przeniesienia kształcenia specjalnościowego na płatne studia podyplomowe.

Powszechność wykształcenia wyższego ciesząca zapewne decydentów, nie idzie jednak w parze z jego poziomem. Studia dwustopniowe w dyscyplinie 'elektrotechnika' spowodowały znaczny spadek ich poziomu. Jest to wynikiem sztucznego podziału treści na dwa stopnie, brak czasu na pierwszym stopniu na zajęcia uzupełniające zaniedbane wykształcenie średnie z zakresu fizyki i matematyki oraz pogoń za oszczędnościami (zmniejszanie liczby godzin, zwiększanie liczebności grup laboratoryjnych). Zaczyna pojawiać się opinia, że absolwenci uczelni powinni osiągać przynajmniej poziom jaki w przeszłości był udziałem absolwentów techników. Likwidacja średniego szkolnictwa zawodowego (techników) spowodowała znacznie zwiększone zapotrzebowanie na inżynierów. Wobec braku techników, studia I-szego stopnia stanowią aktualnie jedyną szansę na wykształcenie kadry technicznej w zakresie elektrotechniki.

### **3.3 Propozycje zmian w zakresie dydaktyki**

W trosce o usprawnienie procesu dydaktycznego, o podniesienie poziomu absolwentów kształconych na kierunku 'elektrotechnika', należałoby podjąć następujące działania:

1. Dokonać gruntownej oceny programów na obu stopniach kształcenia z punktu widzenia ich dostosowania do wymogów współczesnego rynku pracy, eliminowania powtórzeń treści w poszczególnych przedmiotach, właściwej korelacji przedmiotów. Komisje programowe złożone z kadry oraz przedstawicielei przemysłu i elektroenergetyki powinny dokonać gruntownej analizy obecnie realizowanych programów.
2. Należy bezwzględnie rozwiązać problemy występujące na styku pierwszego i drugiego stopnia studiów.

Jednym z wariantów np. mogłoby być:

- odstąpienie od egzaminu (pisanie pracy inżynierskiej) dla studentów, którzy będą kontynuowali studia na drugim stopniu,
  - przedłużenie studiów I-szego stopnia np. o 2-3 miesiące (a nawet o semestr), co umożliwiłoby studentom wykonanie w miarę solidnej pracy dyplomowej i przygotowanie do egzaminu.
  - wprowadzenie sprawdzianu (lub konieczności uzupełnienia kształcenia o przedmioty ze studiów I-szego stopnia) na drugi stopień dla osób, które nie kończyły studiów na pierwszym stopniu na wydziale elektrycznym.
3. Należy rozważyć możliwość ponownego wprowadzenia jednolitych studiów magisterskich 5-letnich, w szczególności na uczelniach o charakterze akademickim.
  4. Elementem procesu kształcenia powinny być praktyki wakacyjne oraz praktyki dyplomowe w firmach specjalistycznych o znaczącej pozycji na rynku pracy. Należy zwiększyć kontakt z przemysłem poprzez np. :
    - umożliwienie zatrudniania osób z przemysłu np. na część etatu lub godziny zlecone poprzez wydzielenie specjalnych funduszy na ten cel, obecne algorytmy przydzielania funduszy na dydaktykę i wymogi formalne zatrudniania specjalistów z przemysłu zniechęcają do takich działań,
    - zwiększenie w ocenie uczelni wagi udziału współpracy z przemysłem tj. aplikacji i wdrożeń.
  5. Na pierwszym stopniu studiów należy zwiększyć liczbę godzin laboratoryjnych i projektowych.
  6. Ważnym instrumentem w procesie rejestracji studentów powinien odgrywać prawidłowo stosowany system ECTS. Rejestracja na kolejny semestr (rok) powinna nastąpić po uzyskaniu co najmniej 80% punktów, co wpłynie na wzrost dyscypliny studiów.
  7. Studia podyplomowe powinny ustawowo uzyskać wysoką rangę. W tym zakresie należałoby podjąć współpracę z organizacjami pozarządowymi (stowarzyszenia naukowo-techniczne) i przemysłem.

## **Dodatek D1 - Badania Nieniszczące Metodami Elektromagnetycznymi**

*Redakcja: naukowa: prof. dr hab. inż. Ryszard Sikora, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny,  
dr hab. inż. Tomasz Chady, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny.*

### **D1.1 Wstęp**

Badania nieniszczące (ang. Nondestructive Testing – NDT) to obecnie bardzo intensywnie rozwijająca się dziedzina nauki i techniki. W literaturze stosowane są jeszcze inne terminy określające tę dziedzinę takie jak: NDI (ang. Nondestructive Inspection) lub NDE (ang. Nondestructive Examination). Niezależnie od nazwy, pod pojęciem badania nieniszczące należy rozumieć różnorodne metody testowania obiektów, które nie wpływają na nie w żaden sposób, nie naruszają ich integralności, nie mają wpływu na ich przydatność i walory użytkowe. Celem badań nieniszczących nie jest sprawdzenie poprawności funkcjonowania badanego obiektu, ale ocena jego stanu, która obejmuje:

- wykrywanie nieciągłości i niejednorodności materiałowych, a także geometrycznych niezgodności,
- pomiar właściwości, takich jak np. twardość czy głębokość hartowania,
- wymiarowanie (określanie wymiarów obiektu lub grubości powłok).

Pomimo tego, że badania nieniszczące stosowane są od wielu lat, to nadal ta dziedzina techniki nie jest powszechnie znana wśród społeczeństwa. Chociaż przeprowadzenie badań nieniszczących nie daje gwarancji, że do ewentualnego zdarzenia o charakterze katastrofy nie dojdzie, to jednak ich rola w zminimalizowaniu możliwości wystąpienia awarii jest nieoceniona. Faktu tego świadomi byli ludzie zajmujący się wytwarzaniem i eksploatacją produktów już od zamierzchłej przeszłości, co potwierdza długa historia rozwoju badań nieniszczących.

Do najważniejszych przesłanek stosowania badań nieniszczących zaliczane są:

- zapobieganie wypadkom, które jest kluczowym zagadnieniem ze względu na możliwość uniknięcia ofiar,
- zmniejszanie liczby awarii i przestojów, co wydatnie ogranicza koszty funkcjonowania przedsiębiorstw,
- poprawę jakości i trwałości sprzyjające poprawie wizerunku firmy produkującej lub eksploatującej dane urządzenie,
- ograniczenie kosztów wytwarzania dzięki inspekcji półproduktów na kolejnych etapach produkcji bez konieczności naruszania ich właściwości.

Badania nieniszczące stosowane są w wielu gałęziach przemysłu, a wśród nich najważniejsze to:

- przemysł energetyczny, ze szczególnym uwzględnieniem energetyki jądrowej i elektrowni wiatrowych,
- przemysł lotniczy,
- przemysł stalowy,
- przemysł stoczniowy,
- przemysł chemiczny i petrochemiczny,
- przemysł wydobywczy, ze szczególnym uwzględnieniem platform wiertniczych i rurociągów przesyłowych,
- kolejnictwo,
- budownictwo,
- przemysł papierniczy,
- przemysł militarny i wojskowość,
- przemysł rozrywkowy (parki rozrywki, wyciągi linowe, itp.),
- ochrona (detekcja materiałów wybuchowych i niebezpiecznych przedmiotów),
- przemysł medyczny (np. testowanie struktury i składu pigułek).

## **D1.2 Stan obecny**

W związku z dynamicznym rozwojem przemysłu i rozszerzeniem zakresu stosowania badań nieniszczących pojawia się coraz więcej różnorodnych metod, które sklasyfikować można ze względu na:

- źródło energii lub medium użyte do testowania obiektu (np. ultradźwięki, mikrofałe, promieniowanie rentgenowskie),
- sposób detekcji i rejestracji sygnału (np. cewka pomiarowa, emulsja światłoczuła),
- sposób przedstawienia i interpretacji otrzymanych wyników.

Stosując powyższe kryteria proponowany jest następujący ogólny podział metod badań nieniszczących:

- metody mechaniczno-wizualne,

- metody akustyczne i ultradźwiękowe,
- metody elektromagnetyczne,
- metody radiologiczne,
- metody termograficzne,
- metody chemiczne i analityczne.

W okresie ostatnich kilkudziesięciu lat w czołowych gospodarkach świata zaobserwować można wyraźny wzrost znaczenia badań naukowych w dziedzinie badań nieniszczących, co powoduje rozwój dotychczasowych metod i wprowadzanie coraz bardziej zaawansowanych metod inspekcji np. technika terahertzowa. W przypadku większości badaczy dominuje przekonanie, iż w chwili obecnej najbardziej popularnymi są następujące metody:

- badania wizualne (VT),
- badania ultradźwiękowe (UT),
- badania radiograficzne (RT),
- badania wiroprądowe Eddy (ECT),
- badania penetracyjne (PT),
- badania magnetyczne – proszkowe (MT).

Potwierdza to analiza prac zamieszczonych w American Journal of Physics, w którym są publikowane prace prezentowane na konferencji QNDE, która wskazuje, że około 50% prac jest poświęconych badaniom ultradźwiękowym, 20% tradycyjnym metodom elektromagnetycznym. Pozostałe prace są poświęcone radiografii, termografii i innym nowoczesnym metodom. Należy zauważyć, że większość z tych metod ma jednak duży związek z elektrotechniką.

Olbrzymi wpływ na kształt współczesnych badań nieniszczących niewątpliwie ma gwałtowny rozwój techniki komputerowej, algorytmów przetwarzania sygnałów i algorytmów sztucznej inteligencji. Pojawienie się komputerów o dużej mocy obliczeniowej umożliwiło praktyczne wykorzystanie symulacji numerycznych. Oprogramowanie symulacyjne ma olbrzymie znaczenie dla analizy zjawisk zachodzących w badanych elementach, interpretacji sygnałów, identyfikacji struktur, projektowania i optymalizacji przetworników pomiarowych itp.

Związek badań nieniszczących z badaniami materiałowymi i duża popularność metody ultradźwiękowej powoduje, że prace badawczo-rozwojowe w dziedzinie badań nieniszczących są prowadzone głównie przez mechaników i fizyków.



W ZUT w Szczecinie zachodzi nieco inna sytuacja. W roku 1980 w ramach programu 02.20 badania nieniszczące zostały wprowadzone na Wydziale Elektrycznym ówczesnej Politechniki Szczecińskiej w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki. Prace nad rozwojem elektromagnetycznych badań nieniszczących są prowadzone również na Wydziałach Elektrycznych Politechniki Warszawskiej, Politechniki Śląskiej i Politechniki Lubelskiej. Na wydziałach tych wykonywane są granty krajowe i europejskie w dziedzinie badań nieniszczących. Na Wydziale Elektrycznym ZUT prowadzone są wykłady z badań nieniszczących metodami elektromagnetycznymi dla studentów krajowych i z zagranicy.

Obecnie, w Polsce są prowadzone prace nad rozwojem następujących metod elektromagnetycznych badań nieniszczących: metody prądów wirowych, metody strumienia rozproszenia, radiografią, metodą potencjałową, tomografią impedancyjną, termografią i metodą terahercową. Wprowadzane są metody sztucznej inteligencji w badaniach nieniszczących. W procesie automatycznej identyfikacji defektów od wielu lat są wykorzystywane metody: sztucznych sieci neuronowych, zbiorów rozmytych i algorytmów genetycznych. Pierwszy raz w literaturze światowej w grancie ISAR (Inteligentny System Analizy Radiogramów) posłużono się opracowaną przez prof. Pawlaka teorią zbiorów przybliżonych. W celu poprawy niezawodności i pełniejszej oceny badanych materiałów prowadzone są prace nad wykorzystaniem algorytmów fuzji danych. Należy nadmienić, iż w ZUT zainicjowano badania nad wykorzystaniem elektromagnetycznych fal terahercowych w badaniach nieniszczących, a szczególnie w testowaniu kompozytów.

Pracownicy WE ZUT biorą udział w pracach wielu międzynarodowych stowarzyszeń zajmujących się rozwojem badań nieniszczących, wśród których wymienić należy World Federation of Nondestructive Evaluation Center w Iowa State University. Dr hab. inż. Tomasz Chady prof. ZUT jest aktualnie prezesem Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP. Polscy uczeni byli w Komitecie Naukowym Światowej Konferencji Badań Nieniszczących (WCNDT) w 2012 w Durbanie (Południowa Afryka) i są w WCNDT'2016 w Monachium. W 2010 r. w Szczecinie odbył się Workshop ENDE (Electromagnetic Nondestructive Evaluation). Przewodniczącym tej konferencji był dr hab. inż. Tomasz Chady, który jest członkiem komitetu naukowego tego międzynarodowego sympozjum. W sympozjum uczestniczyło około 100 osób.

### **D1.3 Plan na przyszłość**

Oprócz tendencji przechodzenia od prostej inspekcji obiektów (NDT) do pełnej oceny badanych elementów nazywanej NDE można zaobserwować inny trend, który

zaczyna odgrywać coraz większą rolę w badaniach nieniszczących. Jest to dążenie do permanentnej inspekcji prowadzonej za pomocą zintegrowanych z badanymi strukturami przetworników. Technologia ta nazywana jest w języku angielskim Structural Health Monitoring (SHM). SHM pozwala na prowadzenie ciągłej kontroli stanu testowanego elementu w bezpośrednim sąsiedztwie krytycznych miejsc. Dzięki temu, możliwe staje się wykrywanie zmian materiałowych na wstępnym etapie powstawania, zanim przekroczą one dopuszczalne rozmiary. Prace nad tymi systemami są już prowadzone w Polsce, ale należy przewidywać ich dalszy gwałtowny rozwój.

Należy dążyć do ścisłej współpracy środowiska Polskich Elektryków ze środowiskiem Mechaników Polskich w dziedzinie badań nieniszczących. Podtrzymując wszystkie kierunki prac prowadzonych obecnie w Polsce nad rozwojem badań nieniszczących, należy zwiększyć wysiłki w kierunku integracji jednostek naukowych i przemysłowych aby upowszechnić nowoczesne metody takie jak np. metoda terahercowa czy radiografia cyfrowa.

Badania Nieniszczące mają duże znaczenie naukowe oraz gospodarcze. Obecnie jesteśmy głównie uczestnikami w międzynarodowych projektach prowadzonych przez ośrodki zagraniczne. Należy dążyć do odegrania roli organizatora prac a nie tylko roli współwykonawcy. W tym celu należy:

1. Utworzyć konsorcjum, które zaoferuje w przyszłej Polskiej elektrowni jądrowej kompleksowe badania nieniszczące. W związku z tym należy podjąć intensywne działania lobbystyczne oraz szkoleniowe. Wprawdzie w Polsce są specjaliści, którzy mieli jakiś udział w prowadzeniu badań nieniszczących na obiektach siłowni jądrowych, nie mniej należy skierować do Francji i USA grupę młodych badaczy w celu pozyskania młodych kadr.
2. Rozwijać badania w dziedzinie wykorzystania sztucznej inteligencji w badaniach nieniszczących, co ma szczególne znaczenie w medycynie.
3. Nawiązać współpracę z ośrodkami medycznymi, w celu prowadzenia badań nad rozwojem nowoczesnych metod diagnostycznych.
4. Rozwijać badania nad metodą terahercową i innymi nowoczesnymi metodami testowania z ukierunkowaniem na ich zastosowanie w inspekcji materiałów kompozytowych.