

doi:10.15199/48.2021.04.17

## Perspektywy rozwoju elektromobilności przy uwzględnieniu obecnego stanu systemu elektroenergetycznego

**Streszczenie.** Rozwój elektromobilności w Polsce powoduje konieczność zaplanowania nowych inwestycji w polskim sektorze elektroenergetycznym. Zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz możliwości przesyłowe linii elektroenergetycznych mogą stanowić pewne ograniczenia w dalszym rozwoju sektora pojazdów napędzanych energią elektryczną. Autorzy po opracowaniu kilku typowych scenariuszy nasycenia rynku pojazdami elektrycznymi w najbliższej przyszłości opracowali analizę zapotrzebowania na energię elektryczną oraz dodatkową moc zainstalowaną w części wytwórczej systemu elektroenergetycznego.

**Abstract.** The development of electromobility in Poland makes it necessary to plan new investments in the Polish power sector. The increased demand for electricity and the transmission capacity of power lines may pose certain limitations to the further development of vehicles powered by electricity. The authors, after developing a few typical scenarios of market saturation with electric vehicles in the near future, developed an analysis of the demand for electricity and additional installed capacity in the generating part of the power system. (Prospects for the development of electromobility, taking into account the current state of the power system).

**Słowa kluczowe:** Elektromobilność, system elektroenergetyczny, produkcja energii, akumulowanie energii.

**Keywords:** Electromobility, electroenergetical system, energy production, energy accumulation.

### Wstęp

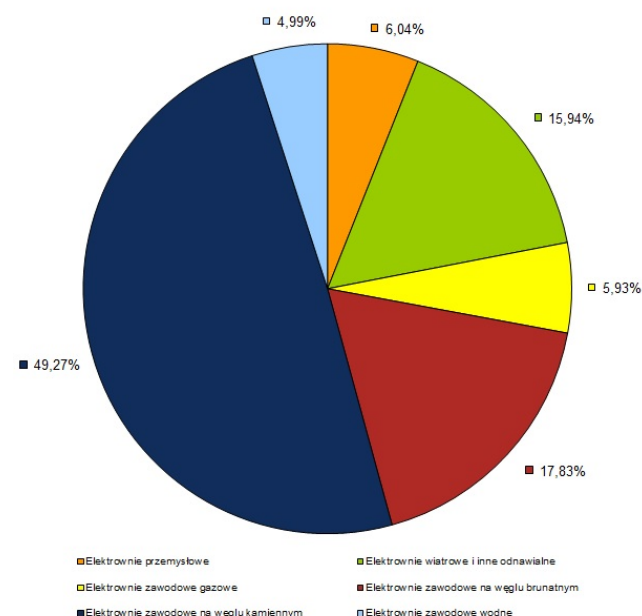
Rozwój motoryzacji od samego początku nieodłącznie związany jest z nieustanną poprawą wydajności jednostek napędowych. Początkowo do napędu pojazdów stosowano silniki parowe, które do końca lat osiemdziesiątych XX wieku napędzały jeszcze część pojazdów szynowych. Ze względu jednak na stosunkowo niewielkie prędkości rozwijane przez lokomotywy z kotłami parowymi oraz pewne trudności eksploatacyjne związane z długotrwałym przygotowaniem do jazdy ostatecznie zostały wyparte przez lokomotywy spalinowe oraz elektryczne. Pojazdy drogowe właściwie od najwcześniejszych lat wyposażano w silniki spalinowe: benzynowe oraz wysokoprężne z krótkim epizodem w postaci wykorzystania napędu elektrycznego. Największym problemem, którego na przestrzeni wielu lat rozwoju techniki nie udało się skutecznie pokonać była stosunkowo duża masa elektrycznej jednostki napędowej oraz zespołu akumulatorów zapewniającego odpowiednie własności trakcyjne oraz przede wszystkim zasięg pojazdu uzyskiwany po naładowaniu akumulatorów. Obecnie pojazdy o napędzie elektrycznym ponownie zdobywają coraz większy udział w rynku motoryzacyjnym głównie za sprawą jednostek hybrydowych oraz ostatnio również pojazdów napędzanych wyłącznie jednostkami elektrycznymi. Przyczyniły się do tego głównie ostatnie odkrycia w zakresie silnych magnesów o niewielkiej masie i wymiarach przez co możliwa stała się budowa wydajnych silników elektrycznych o korzystnym stosunku mocy do masy. Dodatkowo rozwój technologii związanych z gromadzeniem coraz większych ilości energii elektrycznej w niewielkiej objętości bezpośrednio przekłada się na zwiększenie zasięgu pojazdu po pojedynczym ładowaniu.

### System elektroenergetyczny w Polsce

Do produkcji energii elektrycznej w Polsce głównie używa się paliw kopalnych. Niewielki jest udział elektrowni wodnych czy też w ostatnim czasie tzw. zielonej energii pochodzącej m.in. z farm wiatrowych czy też fotowoltaicznych. Niewielki obszar oddziaływania producentów energii ze źródeł odnawialnych sprawia, że ilość wytworzonej energii w skali systemu elektroenergetycznego (SEE) jest marginalna. Na rysunku (Rys. 1.) pokazano strukturę produkcji energii w Polsce.

W polskim systemie elektroenergetycznym (SEE) dominują bloki energetyczne bazujące na spalaniu węgla brunatnego oraz kamiennego (Rys. 2). Udział elektrowni wodnych lub wiatrowych oraz fotowoltaicznych jest marginalny, choć w ostatnich latach daje się zauważyć znaczną dynamikę oraz wzrost znaczenia odnawialnych źródeł energii [1].

W obecnej sytuacji powszechnej dostępności paliw kopalnych oraz ich stosunkowo niskiej ceny struktura systemu elektroenergetycznego (SEE) w kilku kolejnych latach nie powinna się zmienić w sposób istotny.



Rys.1. Struktura mocy zainstalowanej w polskim SEE. Stan na dzień 31.12.2019 [1]

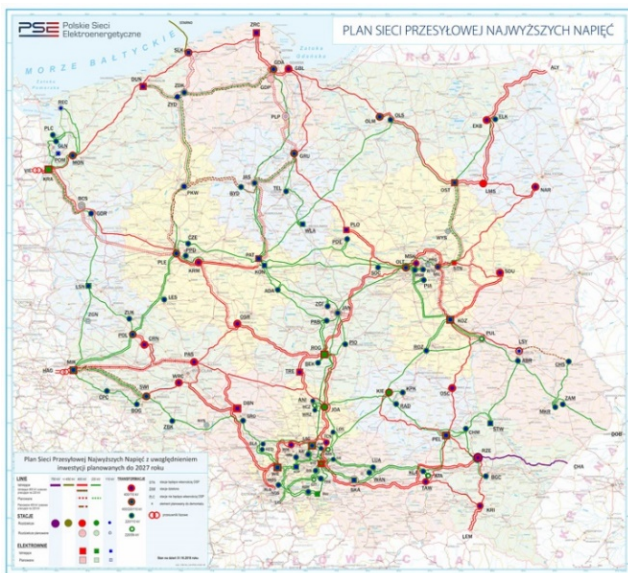
Działania na rzecz ochrony środowiska będą jednak wymuszały określone zmiany poprzez dodatkowe opłaty za emisję CO<sub>2</sub> lub dotowanie ekologicznych źródeł energii.

System elektroenergetyczny to oprócz wytwórców energii także linie przesyłowe najwyższych napięć umożliwiające dystrybucję energii elektrycznej do punktów, w których dokonuje się jej rozdziału i/lub transformacji na inne poziomy napięć.

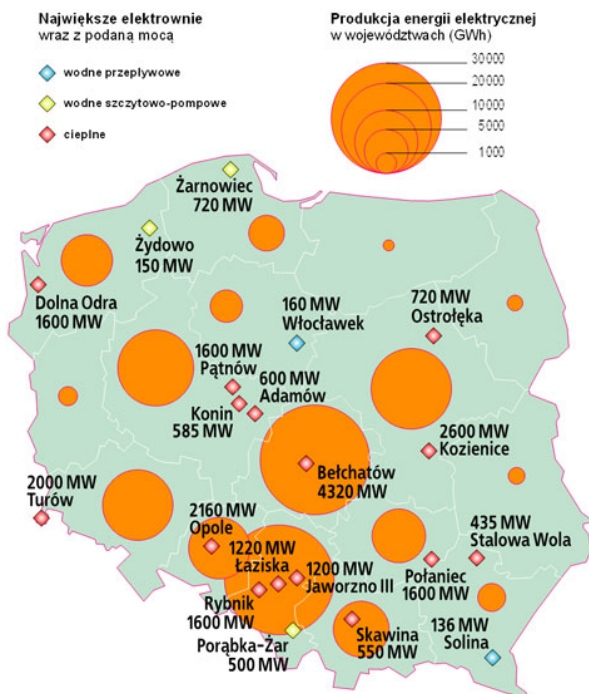
W Polsce operatorem sieci przesyłowej najwyższych napięć jest spółka Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. (PSE S.A.), która według stanu na dzień 31.12.2019 zarządza 269 liniami elektroenergetycznymi prądu przemiennego o łącznej długości 14 692 km oraz 107 stacjami najwyższych napięć. W układzie przesyłowym pracuje:

- 1 linia o napięciu 750 kV o długości 114 km
- 104 linie o napięciu 400 kV łącznej długości 7 008 km
- 164 linie o napięciu 220 kV łącznej długości 7 570 km
- 1 podmorska linia o napięciu 450 kV DC o długości 254 km (z czego 127 km należy do PSE S.A.) [2].

Na rysunku 2 przedstawiono mapę sieci najwyższych napięć [1].



Rys.2. Mapa sieci najwyższych napięć w Polsce [1]



Rys.3. Największe elektrownie na terenie Polski [2]

Można zauważyć większe zagęszczenie sieci elektroenergetycznych w regionie południowym oraz w zachodniej Polsce. Z tego powodu dostawa większej mocy w pozostałych województwach może okazać się utrudniona

i wymagać dodatkowych inwestycji związanych z rozbudową linii oraz stacji elektroenergetycznych. Realizacja nowych obiektów elektroenergetycznych jest zadaniem długotrwałym i kosztownym dlatego też istotne jest takie planowanie sieci aby w dłuższym czasie zachowana była rezerwa mocy do wykorzystania w przyszłości. Obecnie wiele stacji najwyższych napięć jest modernizowana i przebudowywana ze względu na ich brak dostosowania do dzisiejszych realiów. Stan znacznej części urządzeń elektroenergetycznych również nie jest najlepszy szczególnie tych wybudowanych jeszcze w latach siedemdziesiątych XX w. gdzie potrzeby eksploatacyjne wymagają przeprowadzenia koniecznych remontów.

Wieloletnie zaniedbania w tym zakresie teraz ukazują się ze zdwojoną siłą. Aby uniknąć ograniczeń w zakresie produkcji, przesyłu oraz zużycia energii należy wdrożyć politykę w której najważniejsze będzie planowanie rozbudowy istniejącej sieci oraz modernizacji niektórych jej elementów. W przeciwnym przypadku zrealizować mogą się scenariusze związane z ograniczeniami dostaw lub systemowymi blackoutami. Jeśli chodzi o wytwarzanie energii elektrycznej to już obecnie nasz kraj jest importem energii netto. Wszystkie opisane tutaj czynniki mogą utrudnić rozwój elektromobilności oraz bezpośrednio wpływać na jego dynamikę.

### Prognoza zapotrzebowania na energię elektryczną przy wzrastającym udziale pojazdów elektrycznych

Przed dokonaniem analizy zapotrzebowania na energię przy określonych poziomach nasycenia rynku pojazdami elektrycznymi autorzy przygotowali przegląd możliwości wytwórczych oraz przesyłowych Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE).

Dane dotyczące mocy zainstalowanej znajdują się w Tabeli 1, natomiast strukturę produkcji energii elektrycznej w elektrowniach krajowych, wielkości wymiany energii elektrycznej z zagranicą i krajowe zużycie energii elektrycznej w latach 2017÷2019 przedstawiono w Tabeli 2.

Kolejnym krokiem będzie oszacowanie przyszłego zapotrzebowania na moc oraz na energię elektryczną przy założeniu, że 80% samochodów elektrycznych będą stanowiły pojazdy średniej klasy jak np. Nissan Leaf [3], natomiast 20% będą stanowiły pojazdy klasy wyższej i premium takie jak np. Tesla P90d [4].

Według danych katalogowych [3,4] pojazdy te standardowo wyposażone są w baterię akumulatorów o pojemności 40 kWh (Nissan Leaf) lub 90 kWh (Tesla P90d).

Zatem cykl ładowania, uwzględniając sprawność procesów konwersji energii podczas ładowania i rozładowania szacowaną na poziomie 0,8, będzie wymagał dostarczenia z sieci elektroenergetycznej 50 kWh energii elektrycznej dla Nissana Leaf oraz odpowiednio 102,5 kWh dla Tesli P90d.

Tabela 1. Struktura mocy zainstalowanej w KSE [MW] (źródło: <https://www.pse.pl>) [1]

	31.12.2017	31.12.2018	31.12.2019
<b>Ogółem</b>	<b>43 422</b>	<b>45 939</b>	<b>46 808</b>
Elektrownie zawodowe	34 268	36 638	36 675
wodne	2 328	2 341	2 346
ciepne, w tym:	31 940	34 297	34 329
na w. kamiennym	20 247	23 215	23 159
na w. brunatnym	9 352	8 752	8 382
gazowe	2 341	2 330	2 788
Elektrownie wiatrowe i inne odnawialne	6 341	6 621	7 490
Elektrownie przemysł.	2 813	2 680	2 643

Tabela 2. Struktura produkcji energii elektrycznej w latach 2017-2019 w KSE [GWh] (źródło: <https://www.pse.pl>) [1]

	2017	2018	2019
<b>Ogółem</b>	<b>165 852</b>	<b>165 214</b>	<b>158 767</b>
Elektrownie zawodowe	141 790	143 234	134 245
<i>wodne</i>	2 767	2 197	2 454
<i>cieplne, w tym:</i>	139 023	141 037	131 791
<i>na w. kamiennym</i>	79 868	82 375	78 190
<i>na w. brunatnym</i>	51 983	49 072	41 502
<i>gazowe</i>	7 172	9 590	12 099
Elektrownie wiatrowe i inne odnawialne	14 005	11 958	14 344
Elektrownie przemysł.	10 057	10 022	10 178
Saldo wymiany zagr.	2 287	5 718	10 624
Krajowe zużycie energii	168 139	170 932	169 391

Na potrzeby prowadzonych tu analiz autorzy założyli również, że przeciętnie każdy samochód elektryczny będzie raz w tygodniu podlegał jednemu pełnemu cyklowi ładowania. Przyjęto dodatkowo założenie, że czas trwania pojedynczego ładowania każdego z pojazdów wynosi 8 godzin, co przy idealnym harmonogramie ładowania pozwala na przeprowadzenie trzech pełnych cykli ładowania w ciągu doby. Warto również w tym miejscu zaznaczyć, że w praktyce osiągnięcie takiego wyniku jest trudne ponieważ samochody elektryczne są doładowywane zazwyczaj podczas długotrwałych postojów np. w nocy lub podczas pobytu użytkownika w pracy lub w centrach handlowych.

Ze względu na deklarowany przez producenta (Nissan) pobór energii na kilometr: 206 Wh/km daje to zasięg pojazdu wynoszący odpowiednio 270 km w cyklu miejskim lub 389 km w cyklu mieszanym. Dla przeciętnego przebiegu rocznego na poziomie 20 000 km konieczne więc będzie wykonanie około 52 cykli pełnego ładowania w ciągu roku eksploatacji samochodu.

Tabela 3. Zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną dla 15% poziomu nasycenia rynku motoryzacyjnego samochodami o napędzie elektrycznym w podziale na segmenty popularny i premium

Stopień nasycenia rynku 15%	Liczba samochodów elektrycznych	Zapotrzebowanie na moc [MW]	Zapotrzebowanie na energię elektryczną [GWh]
Klasa średnia	2 485 883	1 207	124,3
Klasa premium	621 471	2 131	69,9
<b>Ogółem</b>	<b>3 107 354</b>	<b>3 338</b>	<b>194,2</b>

Wobec powyższych ilość zużytej w ciągu roku energii elektrycznej wyniesie: 2 600 kWh dla pojazdów średniej klasy jak np. Nissan Leaf lub 5 850 kWh dla pojazdu klasy premium jak np. Tesla P90d. Chcąc oszacować wpływ procesu ładowania pojazdów elektrycznych na zwiększenie zapotrzebowania na moc i energię w systemie elektroenergetycznym należy rozważyć kilka scenariuszy obejmujących określony stopień nasycenia krajowego rynku motoryzacyjnego pojazdami elektrycznymi.

Autorzy przyjęli do oszacowania następujące progi 15%, 30% 50%, 80%, 100%.

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w roku 2016 było w Polsce zarejestrowanych 564 pojazdy na 1000 mieszkańców [4]. Jeśli przyjąć liczbę ludności 37,97 mln (wg stanu na rok 2019) [5] daje to 21,6 mln samochodów osobowych poruszających się po drogach. W tabeli 3 pokazano zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną przy poszczególnych scenariuszach rozwoju elektromobilności w Polsce.

Tabela 4. Zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną dla 30% poziomu nasycenia rynku motoryzacyjnego samochodami o napędzie elektrycznym w podziale na segmenty popularny i premium

Stopień nasycenia rynku 30%	Liczba samochodów elektrycznych	Zapotrzebowanie na moc [MW]	Zapotrzebowanie na energię elektryczną [GWh]
Klasa średnia	4 971 766	2 414	248,6
Klasa premium	1 242 942	4 262	139,8
<b>Ogółem</b>	<b>6 214 708</b>	<b>6 676</b>	<b>388,4</b>

Tabela 5. Zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną dla 50% poziomu nasycenia rynku motoryzacyjnego samochodami o napędzie elektrycznym w podziale na segmenty popularny i premium

Stopień nasycenia rynku 50%	Liczba samochodów elektrycznych	Zapotrzebowanie na moc [MW]	Zapotrzebowanie na energię elektryczną [GWh]
Klasa średnia	8 286 277	4 024	414,3
Klasa premium	2 071 570	7 103	233,1
<b>Ogółem</b>	<b>10 357 844</b>	<b>11 128</b>	<b>647,4</b>

Tabela 6. Zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną dla 80% poziomu nasycenia rynku motoryzacyjnego samochodami o napędzie elektrycznym w podziale na segmenty popularny i premium

Stopień nasycenia rynku 80%	Liczba samochodów elektrycznych	Zapotrzebowanie na moc [MW]	Zapotrzebowanie na energię elektryczną [GWh]
Klasa średnia	13 258 040	6 440	662,9
Klasa premium	3 314 510	11 364	372,9
<b>Ogółem</b>	<b>16 572 550</b>	<b>17 804</b>	<b>1 035,8</b>

Tabela 7. Zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną dla 100% poziomu nasycenia rynku motoryzacyjnego samochodami o napędzie elektrycznym w podziale na segmenty popularny i premium

Stopień nasycenia rynku 100%	Liczba samochodów elektrycznych	Zapotrzebowanie na moc [MW]	Zapotrzebowanie na energię elektryczną [GWh]
Klasa średnia	16 572 550	8 050	828,6
Klasa premium	4 143 138	14 205	466,1
<b>Ogółem</b>	<b>20 715 688</b>	<b>22 255</b>	<b>1 294,7</b>

Co interesujące, już od najniższych poziomów nasycenia rynku motoryzacyjnego pojazdami elektrycznymi przy niezmiennym stosunku pojazdów klasy średniej do pojazdów klasy premium, umożliwienie ładowania pojazdów klasy premium wymaga wykorzystania przyłączy o znacznie większych mocach, przy niższym, w stosunku do pojazdów klasy popularnej, zużyciu energii elektrycznej. Ładowanie pojazdów o większych pojemnościach akumulatora lub w trybie przyspieszonym może powodować szereg niepożądanych skutków dla systemu elektroenergetycznego. Najbardziej istotnym z punktu widzenia stabilności systemu elektroenergetycznego efektem związanym z użytkowaniem stacji ładowania pojazdów jest niekorzystny wpływ na kształt krzywej

dobowego zużycia energii elektrycznej co pociąga za sobą konieczność rozbudowy SEE lub wzmożone działania eksploatacyjne w części wytwórczej oraz przesyłowej. Wraz z rozwojem elektromobilności efekt ten będzie się jeszcze pogłębiał. Już przy 15 procentowym nasyceniu rynku pojazdami elektrycznymi zapotrzebowanie na moc wzrosło o dodatkowe 3 338 MW, co odpowiada mocy jednej dużej elektrowni. Dla porównania największa z polskich elektrowni węglowych charakteryzuje się mocą zainstalowaną na poziomie 4 320 MW (Rys. 2) [2]. Warto również zauważyć, że za największą część wzrostu zapotrzebowania na moc będą odpowiadały stacje ładowania o największych mocach przystosowane do szybkiego ładowania pojazdów o największych bateriach akumulatorów. Opierając się na raporcie firmy KPMG widać znaczny wzrost dynamiki sprzedaży samochodów o napędzie hybrydowym oraz elektrycznym [6] (Rys. 4).



Rys.4. Sprzedaż pojazdów o napędzie hybrydowym oraz elektrycznym w Polsce (źródło: Raport firmy KPMG) [6]

Jeśli dynamika sprzedaży pojazdów o napędzie elektrycznym notowana w latach 2014-2017 nie ulegnie zasadniczej zmianie to już w całkiem niedługim czasie może okazać się konieczna rozbudowa systemu elektroenergetycznego o dodatkowe źródła energii elektrycznej oraz linie przesyłowe w celu dostarczenia wymaganej mocy do odbiorców, którzy będą ją zużywać w coraz większym stopniu do ładowania pojazdów elektrycznych.

Porównując ze sobą dane zawarte w powyższych tabelach (Tabela 3 – Tabela 7) daje się zauważyć fakt, że do zapewnienia zasilania stacji ładowania pojazdów elektrycznych konieczne stanie się dostarczenie dodatkowej ilości energii stanowiącej znaczny udział w obecnej strukturze zużycia energii elektrycznej (Tabela 1 oraz Tabela 2). Wzrost znaczenia elektromobilności może być zatem zahamowany poprzez zbyt niski stopień rozwoju systemu elektroenergetycznego nienadążającego za rozwojem nowoczesnych technologii w motoryzacji. Dodatkowym zagrożeniem może być również zmiana taryf energii elektrycznej, która może sprawić, że eksploatacja samochodu elektrycznego nie będzie istotnie mniej kosztowna od eksploatacji tradycyjnych pojazdów wyposażonych w silniki spalinowe. Dodatkowo na wzrost cen energii elektrycznej może wpłynąć polityka klimatyczna i konieczność ponoszenia tzw. opłat z tytułu certyfikatów za emisję gazów cieplarnianych (m. in. CO<sub>2</sub>), co szczególnie w warunkach polskiej struktury źródeł wytwarzania energii elektrycznej byłoby mocno odczuwalne. Biorąc pod uwagę, że cena zakupu samochodu elektrycznego jest blisko dwukrotnie wyższa w stosunku do zakupu pojazdu porównywalnej klasy o napędzie spalinowym, rozwój pojazdów o napędzie wyłącznie elektrycznym może być postrzegany jako ekstrawagancja i nie mieć przy tym racjonalnego uzasadnienia ekonomicznego.

## Podsumowanie

Rozwój elektromobilności w Polsce może w najbliższym czasie napotkać trudności związane z niedostatecznym stanem systemu elektroenergetycznego, na który składają się zarówno niewystarczające moce zainstalowane u wytwórców energii elektrycznej jak również w dużej części przestarzałe linie przesyłowe wymagające gruntownych nakładów inwestycyjnych na ich remonty i modernizację. Przy zwiększającym się na krajowym rynku udziale aut o napędzie elektrycznym problem ten staje się coraz bardziej widoczny. Z punktu widzenia niezawodności systemu oraz bilansowania mocy w poszczególnych jego punktach, równoległe do zwiększania mocy zainstalowanej należy prowadzić rozbudowę oraz modernizację linii przesyłowych w celu umożliwienia rozwoju elektromobilności bez ograniczeń ze strony systemu elektroenergetycznego. Autorzy w powyższym artykule dokonali analiz dla wariantu, w którym ładowanie pojazdów odbywa się w sposób zaplanowany i zgodny z idealnym harmonogramem z punktu widzenia pracy SEE. W rzeczywistości uzyskanie takiego reżimu pracy jest niezwykle trudne, dlatego też sytuacja będzie mniej lub bardziej niekorzystna w stosunku do opisanych tu scenariuszy, na podstawie których wyznaczono zapotrzebowanie na moc zainstalowaną oraz na dodatkową energię elektryczną wytwarzaną na potrzeby sektora elektromobilności.

Niestety rozbudowa systemu elektroenergetycznego jest procesem kosztownym i długotrwałym. Dlatego też należałoby z dużym wyprzedzeniem przewidywać zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną i planować konieczne prace mające na celu dostosowanie systemu elektroenergetycznego do nowych warunków. Ładowanie pojazdów elektrycznych stwarza zapotrzebowanie na dodatkową energię. Energia ta jest pobierana w określonym czasie (np. w nocy lub podczas dziennego szczytu) co może być źródłem problemów dla systemu elektroenergetycznego powodując skoki zużycia energii w cyklu dobowym. Ewentualna rozbudowa systemu elektroenergetycznego powinna uwzględniać gęstość sieci stacji ładowania pojazdów w celu pokrycia tego zwiększonego zapotrzebowania. Na początkowym etapie rozwoju elektromobilności stacje ładowania pojazdów będą powstawać w dużych ośrodkach miejskich. W dalszym czasie należy spodziewać się zapotrzebowania na takie obiekty również w coraz mniejszych miastach. Istnieje konieczność ciągłego śledzenia rozwoju polityki energetycznej w regionie, systemów taryf energetycznych, dopłat inwestycyjnych oraz opłat emisyjnych, które w znaczący sposób mogą przyczynić się do opłacalności zniżania z pojazdów o napędzie elektrycznym lub do zmniejszenia atrakcyjności tego rozwiązania.

**Autorzy:** mgr inż. Jacek Gumiela, Politechnika Wroclawska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: jacek.gumiela@pwr.edu.pl; mgr inż. Mariusz Gurdek, E-mail: biuromde.wroclaw@gmail.com; mgr inż. Robert Kaznowski, E-mail: robertk@mailplus.pl;  
dr hab. Dariusz Sztafrowski prof. PWr, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: dariusz.sztafrowski@pwr.edu.pl.

## LITERATURA

- [1] <https://www.pse.pl>
- [2] <https://wysokienapiecie.pl>
- [3] <https://www.nissan.pl>
- [4] <https://stat.gov.pl/>
- [5] <https://stat.gov.pl/>
- [6] Raport firmy KPMG (2017).