


# 3 czy 25 kV?

## Porównanie systemów zasilania kolejowej sieci trakcyjnej

raport końcowy projektu badawczego

fundacja

**ProKolej** 

# 3 czy 25 kV?

## Porównanie systemów zasilania kolejowej sieci trakcyjnej



Raport opisujący kwestię zmiany napięcia sieci trakcyjnej w Polsce z 3 kV DC na 25 kV AC został przygotowany na podstawie materiału źródłowego Instytutu Kolejnictwa w Warszawie.

### WYDAWCA:

Fundacja „Pro Kolej”,  
ul. Wspólna 47/49, 00-684 Warszawa,  
tel.: +48 22 243 81 37,  
e-mail: fundacja@prokolej.org

### SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI:

Studio Graficzne DART STUDIO  
Dariusz Tuszyński

### REDAKCJA:

dr inż. Artur Rojek  
kierownik Zakładu Elektroenergetyki  
Instytutu Kolejnictwa

### AUTORZY:

dr inż. Janusz Biliński (charakterystyki pojazdów trakcyjnych)  
Krzysztof Feder (mapy)  
mgr inż. Marek Kaniewski (sieć trakcyjna)  
dr Jakub Majewski (wprowadzenie)  
dr inż. Artur Rojek (analizy i obliczenia)

### KOORDYNACJA PROJEKTU:

Paweł Bąk, Karina Pietrak

### PROPOZYCJA CYTOWANIA:

Fundacja ProKolej (2020),  
Porównanie systemów zasilania  
kolejowej sieci trakcyjnej 3 i 25 kV

© Wszelkie prawa zastrzeżone.

Fundacja wyraża zgodę na udostępnianie i cytowanie niniejszej publikacji pod warunkiem podania źródła i wydawcy.

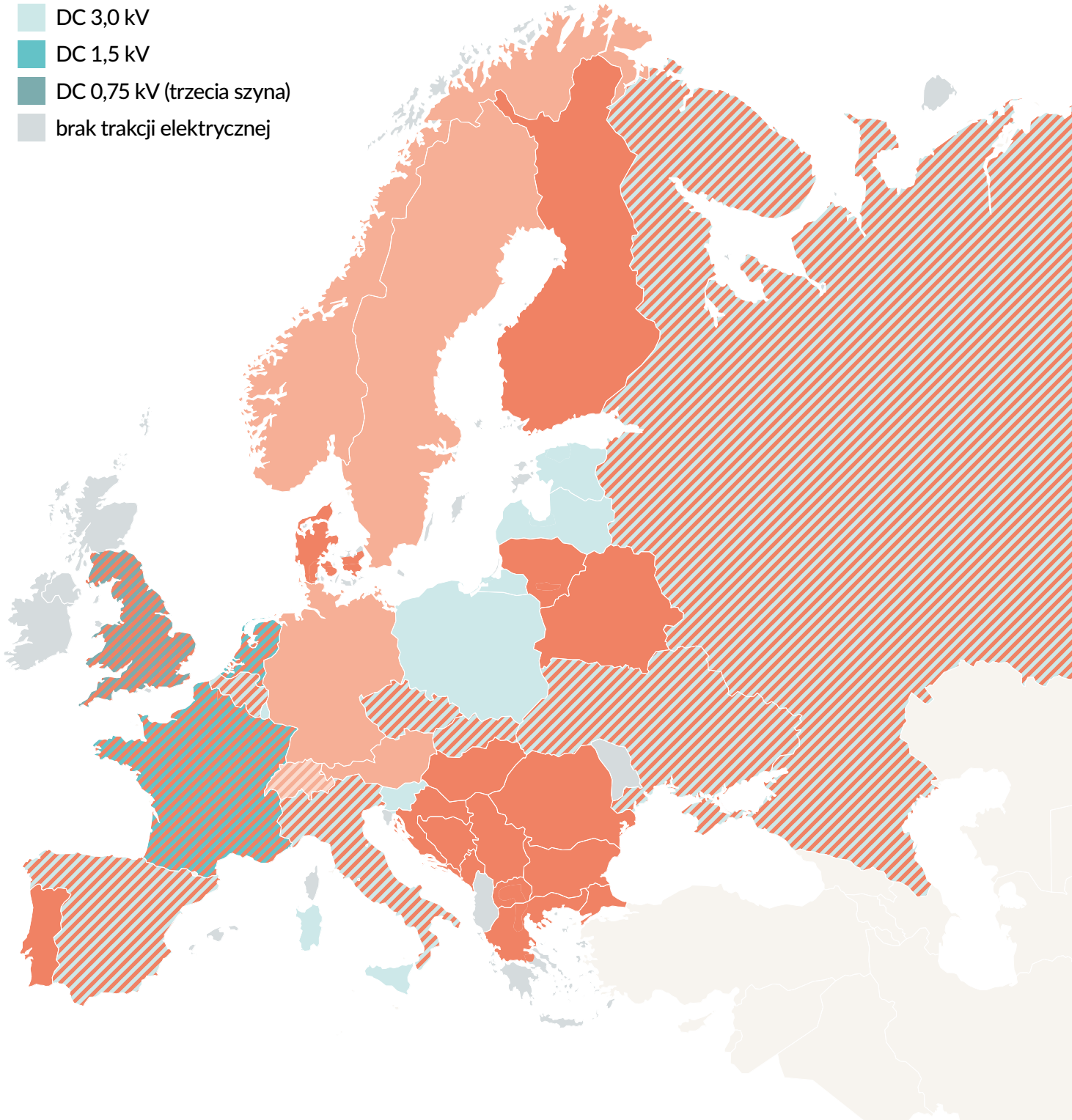
Warszawa 2020

# Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	<b>5</b>
<b>2. Porównanie systemów zasilania trakcji elektrycznej 3 kV DC i 25 kV AC</b>	<b>6</b>
<b>2.1. System zasilania sieci trakcyjnej 3 kV DC</b>	<b>7</b>
<b>2.2. System zasilania sieci trakcyjnej 25 kV AC</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Sieć trakcyjna w systemie 3 kV DC</b>	<b>10</b>
2.3.1 Polska (PKP)	10
2.3.2 Włochy (FS)	11
<b>2.4. Sieć trakcyjna w systemie 2 x 25 kV DC</b>	<b>12</b>
2.4.1 Włochy (FS)	12
2.4.2 Francja (SNCF)	14
2.4.3 Hiszpania	15
<b>2.5. Uwarunkowania zasilania systemów zasilania trakcji</b>	<b>16</b>
<b>2.6. Zestawienie podstawowych parametrów systemów zasilania 3 kV DC i 2 x 25 kV AC i sieci trakcyjnych</b>	<b>18</b>
<b>3. Wpływ rodzaju zasilania na możliwe do uzyskania prędkości, przyspieszenia pociągów i czasy przejazdu dla ruchu towarowego oraz pasażerskiego</b>	<b>20</b>
<b>4. Porównanie charakterystyk trakcyjnych lokomotyw i EZT o rozruchu oporowym i tranzystorowym IGBT</b>	<b>22</b>
<b>4.1. Trasy do symulacji</b>	<b>22</b>
<b>4.2. Opis wybranych lokomotyw i elektrycznych zespołów trakcyjnych</b>	<b>24</b>
4.2.1 Lokomotywa ET22	24
4.2.2 Nowoczesna lokomotywa sześciokoślowa z silnikami asynchronicznymi	25
4.2.3 Elektryczny zespół trakcyjny EN57	25
4.2.4 Nowoczesny elektryczny zespół trakcyjny z napędem asynchronicznym	27
<b>4.3. Założenia do analiz</b>	<b>27</b>
4.3.1 Założenia ogólne	27
4.3.2 Dodatkowe założenia dla symulacji poszczególnych przypadków	29
<b>4.4. Wyniki obliczeń symulacyjnych dla lokomotyw elektrycznych</b>	<b>32</b>
4.4.1 Trasa I – przejazd na odcinku poziomym, prostym o długości 20 km.	32
4.4.2 Trasa II – profil trasy: REGIONAL	33
4.4.3 Trasa III – Łódź Widzew – Koluszki – Skierniewice – Koluszki – Łódź Widzew	34
4.4.4 Trasa IV – Sulejówek – Siedlce – Sulejówek	35
<b>4.5. Wyniki obliczeń symulacyjnych dla elektrycznych zespołów trakcyjnych</b>	<b>36</b>
4.5.1 Trasa I – przejazd na odcinku poziomym, prostym o długości 20 km.	36
4.5.2 Trasa II – profil trasy: REGIONAL	37
4.5.3 Trasa III – Łódź Widzew – Koluszki – Skierniewice – Koluszki – Łódź Widzew	38
4.5.4 Trasa IV – Sulejówek – Siedlce – Sulejówek	40
<b>4.6. Omówienie wyników</b>	<b>41</b>
<b>5. Porównanie zużycia i strat energii w systemach 3 kV DC i 2 x 25 kV AC</b>	<b>42</b>
<b>5.1. Profil linii i rozkład jazdy</b>	<b>42</b>
<b>5.2. Układ zasilania</b>	<b>43</b>
5.2.1 System 3 kV DC	43
5.2.2 System 2 x 25 kV AC	43
<b>5.3. Wyniki obliczeń zużycia energii i strat</b>	<b>44</b>
5.3.1 System 3 kV DC	44
5.3.2 System 2 x 25 kV AC	44
5.3.3 Porównanie strat w systemach 3 kV DC i 2 x 25 kV AC	45
<b>6. Wnioski</b>	<b>47</b>
<b>7. Literatura</b>	<b>49</b>

## Zróźnicowanie zasilania kolei w Europie

- AC 25 kV 50 Hz
- AC 15 kV 16,7 Hz
- AC 11 kV 16,7 Hz
- DC 3,0 kV
- DC 1,5 kV
- DC 0,75 kV (trzecia szyna)
- brak trakcji elektrycznej



Źródło: Fundacja ProKolej

# 3 czy 25 kV?

## Porównanie systemów zasilania kolejowej sieci trakcyjnej



### Wstęp

Rozwój kolei, a następnie systemów zasilania w poszczególnych krajach europejskich przebiegał w większości autonomicznie. O wyborze danego systemu decydowały względy techniczne, poziom wiedzy, kwestie gospodarcze i polityczno-militarne. Zwłaszcza na początku liczba spotykanych wariantów i rozwiązań była bardzo duża – i to nie tylko na poziomie poszczególnych krajów, ale wręcz regionów. Stopniowo jednak transport kolejowy i pracujący dla niego przemysł wzmacniały swój wymiar międzynarodowy. W rezultacie nietypowe rozwiązania ustępowały i na obecnym etapie spotykamy w Europie cztery dominujące systemy zasilania 1,5 kV DC, 3 kV DC, 15 kV 16,7 Hz i 25 kV 50 Hz.

Trudno jednoznacznie ocenić, które z nich jest najlepsze. Ale przy okazji kreślenia nowych, ambitnych planów inwestycyjnych dla polskiej kolei zintensyfikowała się dyskusja o tym, czy należy upierać się przy obecnym systemie elektryfikacji opartym na zasilaniu prądem stałym. Wróciły argumenty zarówno za pozostawieniem obecnego systemu, jak również pełną przebudową sieci na prąd przemienny.

Aby nieco uporządkować toczącą się debatę, z inicjatywy Fundacji ProKolej przygotowany został raport Instytutu Kolejnictwa opisujący techniczne konsekwencje wyboru systemu zasilania 3 kV DC lub 2 x 25 kV AC. Szczegółowe dane na ten temat są bowiem mocno rozproszone – i stąd inicjatywa zebrania ich w krótkim materiale i przybliżenia tej, dość skomplikowanej kwestii w przystępnej formie.

Zastanawiając się, które z tych dwóch rozwiązań byłoby najlepsze dla kolei w Polsce trzeba przeanalizować nie tylko sieć trakcyjną i podstacje, ale również układ zasilania zewnętrznego i charakterystykę taboru. Bo każdy z tych elementów ma swoje miejsce w budowaniu konkurencyjności i efektywności systemu kolejowego.



Planowana zmiana systemu zasilania sieci trakcyjnej na Słowacji, a następnie w Czechach oraz spodziewana realizacja pierwszych krajowych linii zelektryfikowanych w systemie 25 kV AC oznacza, że polska kolej w coraz mniejszym stopniu pozostanie jednolitym obszarem 3kV DC. Wręcz przeciwnie, zwiększanie wolumenu przewozów intermodalnych, intensyfikacja komunikacji z sąsiednimi krajami, wzrost znaczenia połączeń tranzytowych Chin do Europy Zachodniej czy zapowiadany renesans pasażerskich połączeń międzynarodowych to rosnące wyzwanie w postaci łączenia wielu systemów kolejowych. A w takiej rzeczywistości zyskują przewagę ci, którzy nie muszą za każdym razem wymieniać lokomotyw i załóg na granicach.

Dlatego, bez względu na ostateczny kształt przyszłych programów inwestycyjnych, czy decyzje i harmonogram realizacji komponentu kolejowego Centralnego Portu Komunikacyjnego będzie w Polsce rosło zapotrzebowanie na rozwiązania wielosystemowe. Presja w tym obszarze będzie tym większa, że w przypadku floty, nowoczesne pojazdy będą potrzebne nie tylko do rozwoju mobilności i logistyki, a zastępowania wyeksploatowanego technicznie taboru, pochodzącego często jeszcze z lat 70-tych.

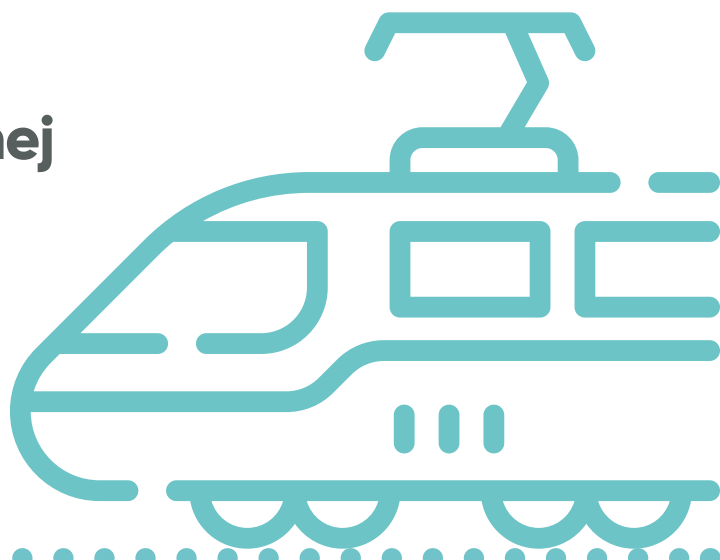
Dyskusja o różnych systemach zasilania przy okazji przyszłych inwestycji infrastrukturalnych po stronie energetyki, infrastruktury i taboru to dodatkowe wyzwanie dla inwestorów, wykonawców i przewoźników. Ich odpowiedź powinna być w tym zakresie możliwie elastyczna – tak, aby rozwijać się w coraz bardziej zmiennym otoczeniu.

**dr Jakub Majewski**

Prezes Fundacji „Pro Kolej”

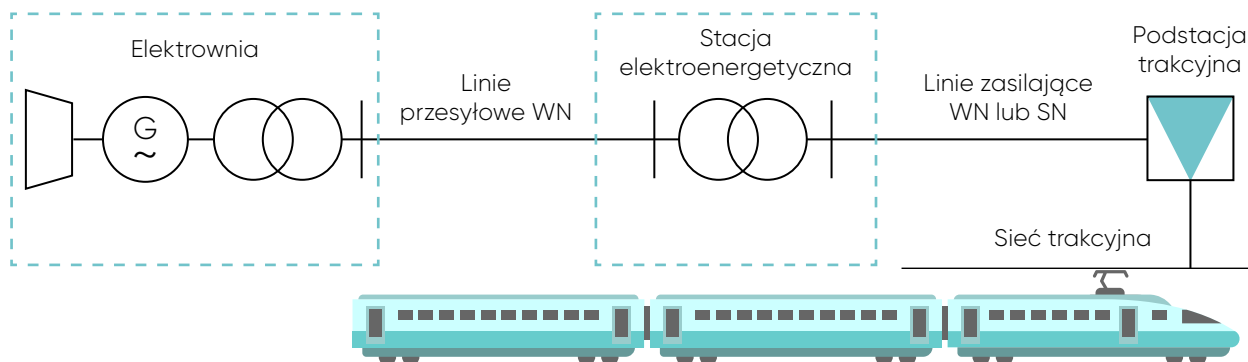
## Porównanie systemów zasilania trakcji elektrycznej 3 kV DC i 25 kV AC

2



Początkiem systemu zasilania trakcji elektrycznej jest generator w elektrowni, a końcem styk sieci trakcyjnej z pojazdem trakcyjnym – sieci jezdnej z pantografem i kół z siecią powrotną (szynami). Przyjęte dla danej

sieci rozwiązania techniczne i ich ewentualne modyfikacje trzeba oceniać w sposób kompleksowy - biorąc pod uwagę wszystkie elementy wchodzące w skład tego układu.



Rys. 2.1. Uproszczony schemat systemu zasilania trakcji elektrycznej [17]

W różnych krajach europejskich rozwój systemów zasilania był niezależny. O wyborze danego systemu decydowały względy techniczne, kierunki prowadzonych badań, jak również kwestie gospodarcze i polityczno-militarne. Wśród wielu wariantów i rozwiązań wykształciły się cztery dominujące systemy zasilania trakcji elektrycznej. Są to systemy:

- 1,5 kV DC,
- 3 kV DC,
- 15 kV 16,7 Hz<sup>1</sup>,
- 25 kV 50 Hz.

O tym, jaki system jest stosowany w danym kraju, decydował okres elektryfikacji i powiązania polityczno-gospodarcze. Przykładem takich zależności jest system 15 kV 16,7 Hz, który został opracowany w Niemczech i rozpowszechniony w krajach niemieckojęzycznych (Niemcy, Austria, Szwajcaria) oraz powiązanych z nimi gospodarczo Szwecji i Norwegii. Szóstym europejskim krajem, w którym stosuje się system 15 kV 16,7 Hz, jest Liechtenstein. Przez jego obszar przebiega zelektryfikowana linia kolejowa z siecią trakcyjną zasilaną przez podstacje trakcyjne znajdujące się w Austrii i Szwajcarii.

<sup>1</sup> Zapis dziesiętny wartości częstotliwości 16,7 Hz wprowadzono w czasie prac nad Technicznymi Specyfikacjami Interoperacyjności. Faktyczna wartość częstotliwości wynosi 16 2/3 Hz.

W państwach, w których linie kolejowe zelektryfikowano w systemach prądu stałego, na liniach dużych prędkości budowany jest obecnie system 25 kV 50 Hz.

### 2.1. System zasilania sieci trakcyjnej 3 kV DC



W systemie 3 kV DC, z uwagi na stosunkowo niskie napięcie zasilające pojazdy trakcyjne, występują duże wartości prądów. Wiąże się z tym potrzeba stosowania sieci trakcyjnych o dużym przekroju, wykonanych z elementów o jak najniższej rezystancji. W Polsce sieci jezdne na torach szlakowych mają przekrój od 320 do 450 mm<sup>2</sup>, a w Europie przekrój ten osiąga nawet 610 mm<sup>2</sup>.

W systemie 3 kV DC podstawowo sieć trakcyjna zasilana jest dwustronnie z podstacji trakcyjnych rozmieszczonych w odległościach od około 10 do 30 km od siebie. W celu zmniejszenia spadków napięcia i lepszego sekcjonowania elektrycznego sieci trakcyjnej, na liniach dwutorowych stosowane są kabiny sekcyjne, w szczególności gdy odległość pomiędzy podstacjami przekracza 12–15 km.

W Polsce podstacje trakcyjne o mocy od około 8 do ponad 23 MW (przeciętnie około 11 MW) zasilane są napięciem średnim (SN) 15 lub 20 kV oraz napięciem wysokim (WN) 110 kV z publicznej sieci elektroenergetycznej. Nieliczne podstacje zasilane są napięciem 30 kV. Z uwagi na pewność i niezawodność zasilania podstacje powinny być zasilane dwiema liniami

zasilającymi. W przypadku zasilania napięciem 110 kV, w uzasadnionych technicznie i ekonomicznie sytuacjach dopuszcza się zasilanie podstacji jedną linią. System ten jest przeznaczony do zasilania pojazdów trakcyjnych o mocy do około 6 MW.

Uproszczony schemat układu zasilania w systemie 3 kV DC został przedstawiony na rysunku 2.2.

Przeciętna podstacja z dwoma zespołami prostowniczymymi zajmuje teren o powierzchni około:

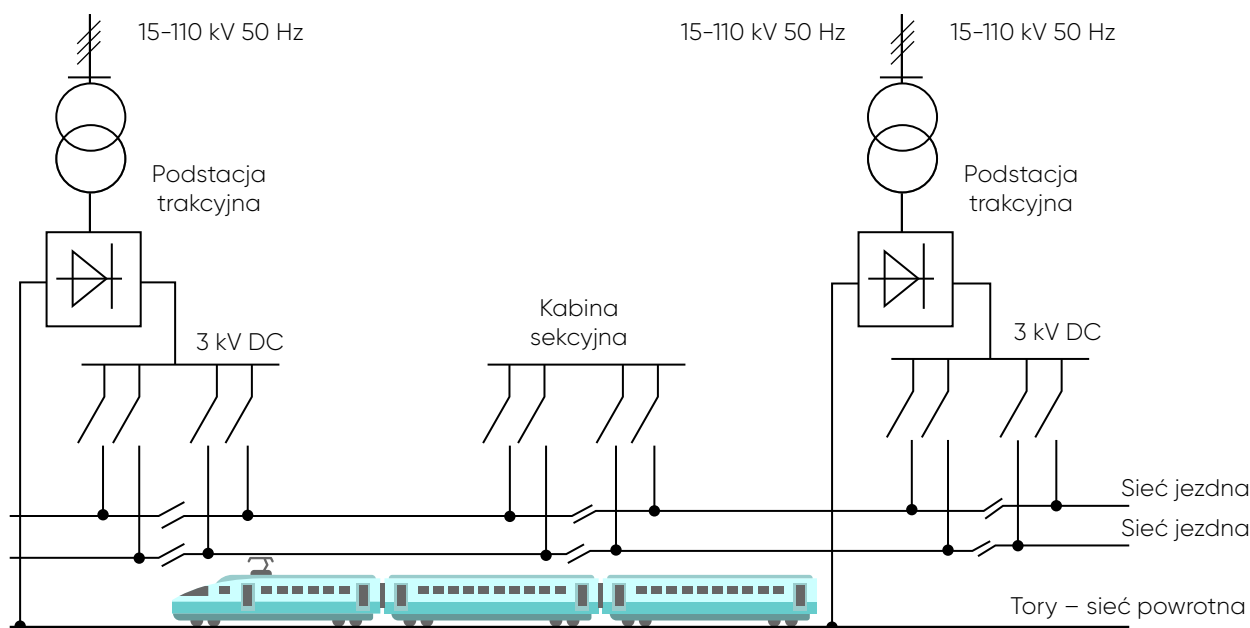
- 1700 m<sup>2</sup> przy zasilaniu napięciem do 30 kV;
- 4000 m<sup>2</sup> przy zasilaniu napięciem 110 kV.

Kabiny sekcyjne, w zależności od wykonania (kontenerowe, budynkowe) zajmują teren do 100 m<sup>2</sup>. Oznacza to, że przy założeniu odstępu pomiędzy obiektami zasilania wynoszącym 12 km zajmują one teren od 75 m<sup>2</sup> (podstacje co 24 km z kabinami sekcyjnymi) do 330 m<sup>2</sup> (podstacje zasilane napięciem 110 kV co 12 km) przeliczając na 1 km linii kolejowej.

### 2.2. System zasilania sieci trakcyjnej 25 kV AC



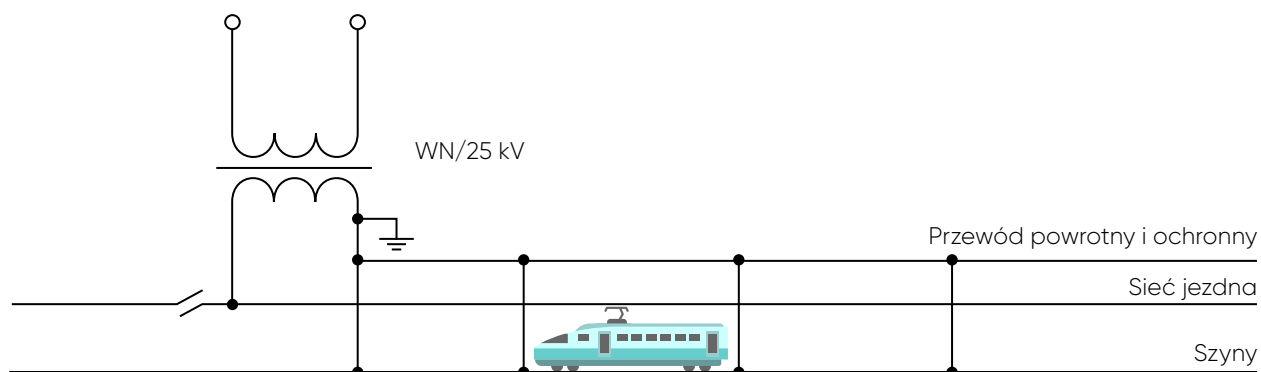
System przemiennoprądowy o napięciu 25 kV 50 Hz eksploatowany jest w licznych krajach Europy. Stosuje się go do zasilania sieci trakcyjnych na liniach dużych prędkości w krajach, w których linie konwencjonalne zasilane są w systemach stałoprądowych. Moce zasilanych pojazdów trakcyjnych mogą osiągać wartość do około 20 MW.



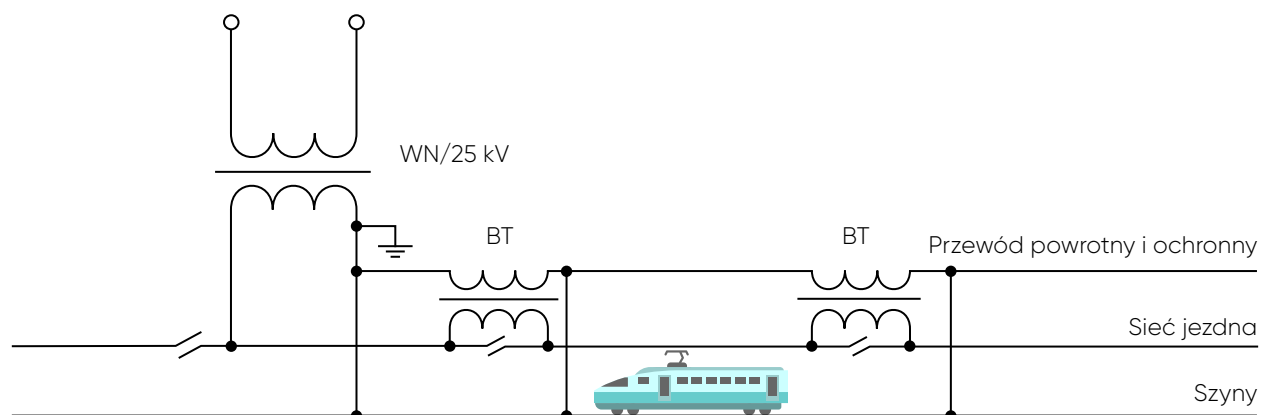
Rys. 2.2. Uproszczony schemat układu zasilania trakcji elektrycznej w systemie 3 kV DC [17]

Najprostszy układ zasilania w systemie 25 kV 50 Hz przedstawiono na rysunku 2.3. Jest on praktycznie niestosowany z uwagi na znaczny upływ prądu powrotnego do ziemi i zakłócenia w obwodach telekomunikacji. Aby tego uniknąć, wykorzystuje się układy z transformatorami odsysającymi (BT) zainstalowanymi

co kilka kilometrów, których jedno z uzwojeń włączone jest między szyny a dodatkowy przewód powrotny. Zadaniem tych transformatorów jest wymuszenie przepływu prądu (odprowadzenie) z szyn jezdnych do przewodu powrotnego. Układ ten przedstawiono na rysunku 2.4.



**Rys. 2.3.** Uproszczony schemat układu zasilania trakcji elektrycznej w systemie 25 kV 50 Hz [17]



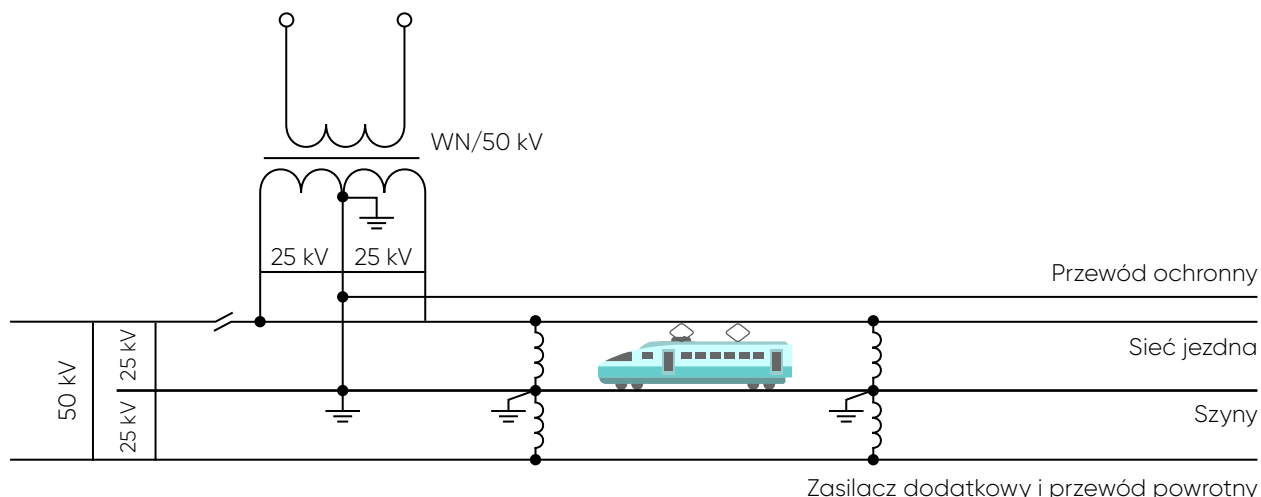
**Rys. 2.4.** Uproszczony schemat układu zasilania trakcji elektrycznej w systemie 25 kV 50 Hz z transformatorami odsysającymi (BT) [17]

Na rysunku 2.5 pokazano uproszczony schemat najnowszego rozwiązania, jakim jest system 2 x 25 kV 50 Hz. W systemie tym transformatory zainstalowane w podstacjach trakcyjnych posiadają po dwa uzwojenia wtórne o napięciu 25 kV, których wspólny środkowy zacisk jest uzziemiony i połączony z szynami oraz przewodem powrotnym. Koniec jednego z uzwojeń połączony jest z siecią jezdnią, a koniec drugiego z dodatkowym przewodem zasilającym. Pomiędzy podstacjami znajdują się autotransformatory rozmieszczone w odległościach od kilku do kilkunastu kilometrów od siebie. Są one włączone między sieć jezdnią a dodatkowy przewód

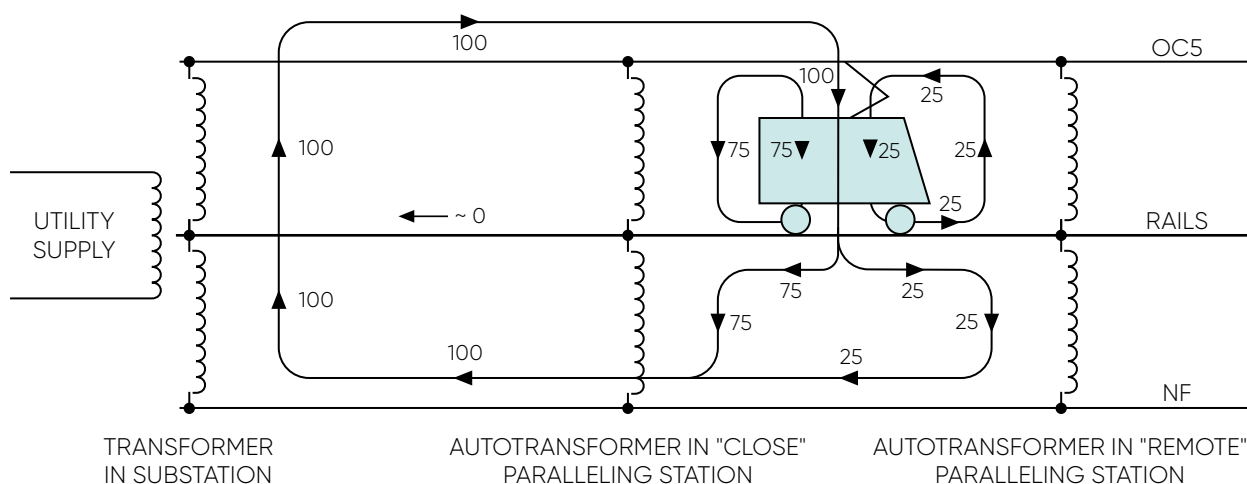
zasilający. W wyniku tego napięcie pomiędzy siecią trakcyjną a szynami jezdnyymi wynosi 25 kV, a przesył energii z podstacji do autotransformatorów odbywa się na poziomie od 35,4 do 50 kV, w zależności od rozwiązania transformatora – kąta przesunięcia napięć wyjściowych względem siebie. Pozwala to na zmniejszenie spadków napięcia w układzie zasilania oraz zwiększenie odległości między podstacjami trakcyjnymi, które mogą wynosić nawet znacznie powyżej 60 km. Przeciętnie odległość między podstacjami wynosi od 20 do 70 km. Zasadę działania systemu 2 x 25 kV AC przedstawia rysunek 2.6.



## Porównanie systemów zasilania kolejowej sieci trakcyjnej



Rys. 2.5. Uproszczony schemat układu zasilania trakcji elektrycznej w systemie 2 x 25 kV 50 Hz [17]



Rys. 2.6. Przepływ prądu w systemie 2 x 25 kV AC [22]

W systemie 25 kV 50 Hz podstacje trakcyjne, które mogą osiągać moc 120 MVA, zasilane są z publicznej trójfazowej sieci energetycznej o napięciu minimum 110 kV. W podstacji trakcyjnej są dwa transformatory o mocy od 10 do 60 MVA. W celu zminimalizowania asymetrii obciążenia systemu elektroenergetycznego układy transformatorów zaprojektowano tak, że kolejne odcinki sieci trakcyjnej zasilane są z innej fazy. Konsekwencją tego jest brak możliwości zasilania dwustronnego sieci trakcyjnej i pracy równoległej podstacji.

O mocy transformatorów i odległościach między podstacjami decyduje zakładany ruch pociągów oraz możliwości zasilania podstacji z systemu elektroenergetycznego.

Moc transformatorów powinna być dwukrotnie wyższa od zakładanej w warunkach normalnej pracy. Zwiększenie

mocy jest konieczne z uwagi na zapewnienie zasilania sieci trakcyjnej w przypadku wyłączenia sąsiedniej podstacji. Pomiędzy podstacjami w odległości od około 10 do 15 km zainstalowane są kabiny sekcyjne z autotransformatarami. Przykładowo w Kalifornii zaprojektowano system 2 x 25 kV AC z podstacjami o mocy 60 MVA rozmieszczonymi co 30 km oraz autotransformatarami co 5 km [22].

Przeciętna podstacja z dwoma transformatorami zajmuje teren o powierzchni około 3500 m<sup>2</sup>. Kabina sekcyjna pośrednia (z jednym autotransformatorem) zajmuje teren około 1200 m<sup>2</sup>, a końcowa (z dwoma autotransformatarami) około 2300 m<sup>2</sup>. Oznacza to, że przy założeniu odstępów pomiędzy podstacjami wynoszącym 45 km oraz pomiędzy kabinami wynoszącym 11–12 km zajmują one teren ponad 180 m<sup>2</sup> przeliczając na 1 km linii kolejowej.

## 2.3. Sieć trakcyjna w systemie 3 kV DC



Trzecią wersją tej sieci cechują następujące obliczeniowe mechaniczne i elektryczne parametry [11]:

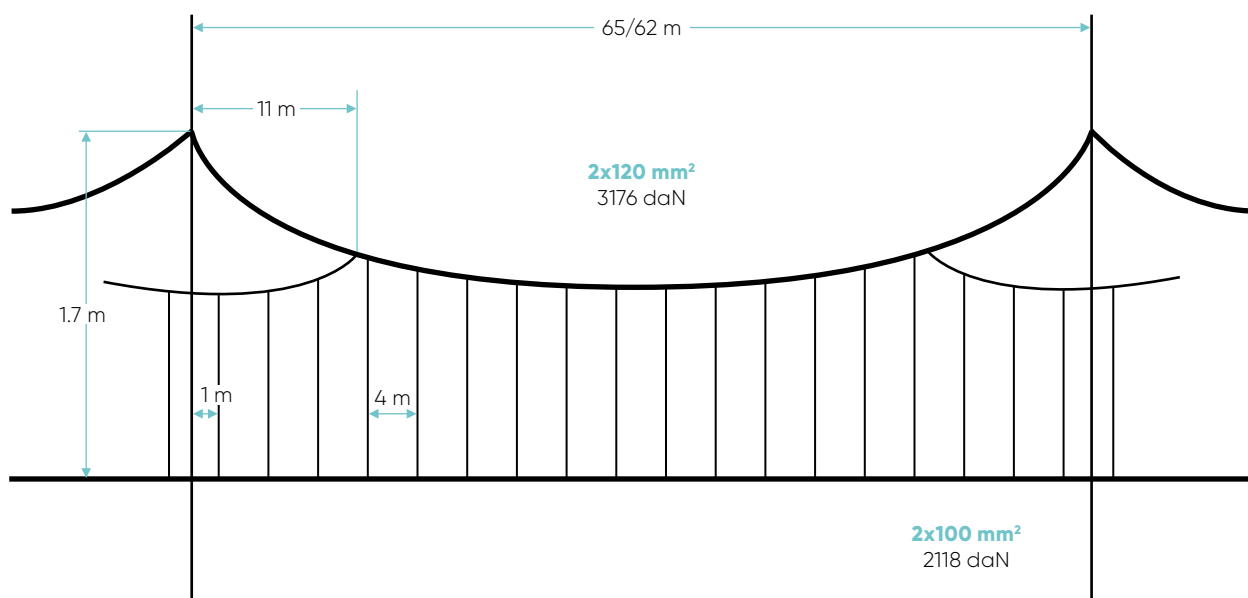
### 2.3.1. Polska (PKP PLK)



W Polsce, w systemie zasilania 3 kV DC została zaprojektowana i wybudowana sieć trakcyjna typu 2C120-2C-3, ze scalonym układem lin nośnych [10], [11]. Istota scalonego układu polega na tym, że zasadnicza lina nośna i lina nośna pomocnicza w przęśle prowadzone są równolegle obok siebie. Rozchodzą się w obszarze konstrukcji wsporczej, gdzie lina nośna mocowana jest na ukośniku a lina nośna pomocnicza znajduje się pod ukośnikiem i tworzy uelastycznienie o długości 2x11 m (rys. 2.7).

Każda lina nośna ma przekrój poprzeczny 120 mm<sup>2</sup>, a każdy przewód jezdny ma przekrój 100 mm<sup>2</sup>.

- liczba lin nośnych – 2,
- naciąg w linach nośnych  $F_a = 3176$  daN,
- liczba przewodów jezdnych – 2,
- naciąg w przewodach jezdnych  $F_b = 2118$  daN,
- długość uelastycznienia: 22 m ,
- normalna długość przęsła: 65 m w strefie nizinnej i 62 m w strefie górskiej i w pobliżu morza,
- długość odcinka naprężenia wynosi 1400 m,
- wysokość konstrukcyjna: 1,70 m,
- odległość pierwszego wieszaka od słupa: 1 m,
- odległość między kolejnymi wieszakami: na tym samym przewodzie jezdny wynosi co 8 m, na sąsiednich przewodach jezdnych wynosi co 4 m,
- maksymalna prędkość jazdy przy jeździe pociągu z jednym pantografem 250 km/h.



Rys. 2.7. Sieć trakcyjna typu 2C120-2C-3

### Obliczenie całkowitego przekroju i ciężaru sieci jezdnej



Sumaryczne poprzeczne pole przekrojów przewodów sieci  $S_{\text{suma}}$  wynosi:

$$S_{\text{suma}} = (2 \times 120) + (2 \times 100) = 440 \text{ mm}^2$$

Przyjmując, że przewody jezdne są wykonane z miedzi CuAg0,01 masa jednego metra przewodów sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$\text{Masa}_c = (2 \times 1,060) + (2 \times 0,890) = 2,12 + 1,78 = 3,9 \text{ kg/m}$$

### 2.3.2. Włochy (FS)



#### Sieć trakcyjna typu FR 5AV

Siecią trakcyjną systemu zasilania 3 kV na której można osiągnąć maksymalną prędkość jazdy przy jeździe pociągu z jednym pantografem 250 km/h, jak pokazano w prezentacji firmy ITALFERR [7] jest sieć typu FR 5AV. Składa się ona z dwóch lin nośnych o przekroju 120 mm<sup>2</sup> każda i dwóch przewodów o przekroju 150 mm<sup>2</sup> każdy.

Sieć jezdnią cechują następujące obliczeniowe mechaniczne i elektryczne parametry [7]:

- liczba lin nośnych – 2,
- naciąg w linach nośnych  $F_c = 3000$  daN,
- liczba przewodów jezdnych – 2,
- naciąg w przewodach jezdnych  $F_a = 3750$  daN,
- maksymalna prędkość jazdy przy jeździe pociągu z jednym pantografem 250 km/h.



#### Obliczenie całkowitego przekroju i ciężaru sieci jezdnej

Sumaryczne pole przekrojów poprzecznych przewodów sieci  $S_{\text{suma}}$  wynosi:

$$S_{\text{suma}} = (2 \times 120) + (2 \times 150) = 540 \text{ mm}^2$$

Sumaryczna masa  $M_{\text{masa}_c}$  jednego metra przewodów sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$M_{\text{masa}_c} = (2 \times 1,060) + (2 \times 1,335) = 2,12 + 2,67 = 4,79 \text{ kg/m}$$

#### Sieć trakcyjna na linii „Direttissima” w części północnej

Sieć trakcyjną typu „Direttissima” systemu zasilania 3 kV dopuszczoną do maksymalnej prędkości jazdy przy jeździe pociągu z jednym pantografem 250 km/h, opisano w opracowaniu [19]. Składa się ona z dwóch lin nośnych o przekroju 160 mm<sup>2</sup> każda z miedzi kadmowej (CuCd) i dwóch przewodów jednych (CuETP) o przekroju 150 mm<sup>2</sup> każdy.

Sieć trakcyjną cechują następujące obliczeniowe mechaniczne i elektryczne parametry [7]:

- liczba lin nośnych – 2,
- naciąg w linach nośnych  $F_c = 2 \times 1500$  daN,
- liczba przewodów jezdnych – 2,
- naciąg w przewodach jezdnych  $F_a = 2 \times 1500$  daN,
- maksymalna prędkość jazdy przy jeździe pociągu z jednym pantografem 250 km/h.

#### Obliczenie całkowitego przekroju i ciężaru sieci jezdnej

Sumaryczne pole przekrojów przewodów sieci  $S_{\text{suma}}$  wynosi:

$$S_{\text{suma}} = (2 \times 160) + (2 \times 150) = 620 \text{ mm}^2$$

Sumaryczna masa jednego metra przewodów sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$M_{\text{masa}_c} = (2 \times 1,440) + (2 \times 1,335) = 2,88 + 2,67 = 5,55 \text{ kg/m}$$



## 2.4. Sieć trakcyjna w systemie 2 x 25 kV DC



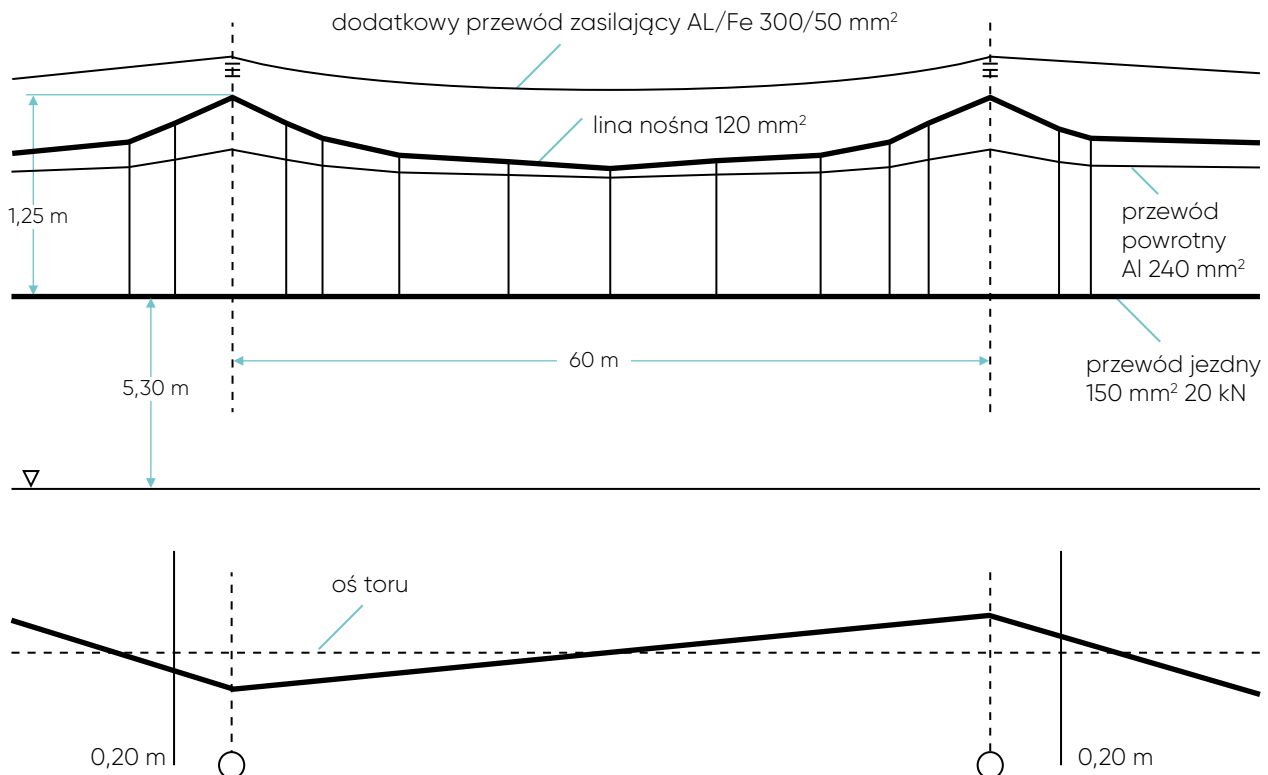
### 2.4.1. Włochy (FS)

Jak podano w prezentacji firmy ITALFERR [7] i artykule [19] sieć trakcyjną dla systemu zasilania 25 kV i dla prędkości jazdy 300 jest sieć typu FR25AV. Składa się ona z liny nośnej o przekroju 120 mm<sup>2</sup> Cu i przewodu jezdnego o przekroju 150 mm<sup>2</sup> Cu oraz dodatkowego przewodu zasilającego 300 mm<sup>2</sup> Al/St i dodatkowego przewodu powrotnego 150 mm<sup>2</sup> Al/St. Sieć trakcyjna FR25 AV jest siecią łańcuchową bez uelastycznienia pod słupem, zasilaną w systemie 2 x 25 kV 50 Hz z podstacji z jednofazowym transformatorem, który po stronie wtórnej ma odczep połączony z szyną jezdnią i autotransformatorem również połączonymi z szyną jezdnią. Pierwszy odcinek został zbudowany pomiędzy miastami Rzym i Neapol.

Podstawowe parametry sieci jezdnej to:

- wysokość konstrukcyjna sieci: 1,25 m,
- przewód jezdny wykonany z miedzi (CuMg) o przekroju poprzecznym 150 mm<sup>2</sup>,
- naciąg przewodu jezdnego: 20 kN,
- lina nośna wykonana z miedzi o przekroju 120 mm<sup>2</sup>,
- naciąg liny nośnej: 16,25 kN,
- wieszaki prądowe wykonane z linki (brąz) o przekroju poprzecznym 16 mm<sup>2</sup>,
- odsuw przewodu jezdnego: ±0,2 m,
- maksymalna rozpiętość przęsła normalnego: 60 m,
- maksymalna długość odcinka naprężenia: 1500 m,
- minimalna wysokość zawieszenia przewodu jezdnego: 5,3 m,
- prąd znamionowy: 700 A,
- maksymalna prędkość jazdy: 300 km/h,
- prąd zwarciovowy: 15 kA.

Sieć posiada dodatkowy przewód zasilający „minusowy”: Al/Fe 300 mm<sup>2</sup>. Przewód zasilająco-powrotny: Al/Fe 147 mm<sup>2</sup>. System zasilania może zasilać pociągi o mocy 12 MW jadące z czasem następstwa 5 min. Odległości izolacyjne do potencjału ziemi: 500 i 270 mm. Odległość izolacyjna między siecią jedną a zasilaczem 750 mm.



Rys. 2.8. Sieć trakcyjna typu FR25AV

### Obliczenie całkowitego przekroju i ciężaru sieci jezdnej

Sumaryczne pole przekrojów poprzecznych miedzianych przewodów sieci  $S_{\text{sumaCu}}$  wynosi:

$$S_{\text{sumaCu}} = 120 + 150 = 270 \text{ mm}^2$$

Sumaryczne pole przekrojów poprzecznych Al/St przewodów sieci  $S_{\text{sumaAl}}$  wynosi:

$$S_{\text{sumaAl}} = 300 + 150 = 450 \text{ mm}^2$$

Sumaryczna masa jednego metra części miedzianych przewodów sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$\text{Masa}_{\text{Cu}} = 1,060 + 1,335 = 2,395 \text{ kg/m}$$

Sumaryczna masa jednego metra części Al/Fe przewodów sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$\text{Masa}_{\text{Al}} = 1,211 + 0,615 = 1,826 \text{ kg/m}$$

Sumaryczna masa jednego metra sieci jezdnej będą wynosił:

$$\text{Masa}_c = 1,826 + 2,395 = 4,221 \text{ kg/m}$$

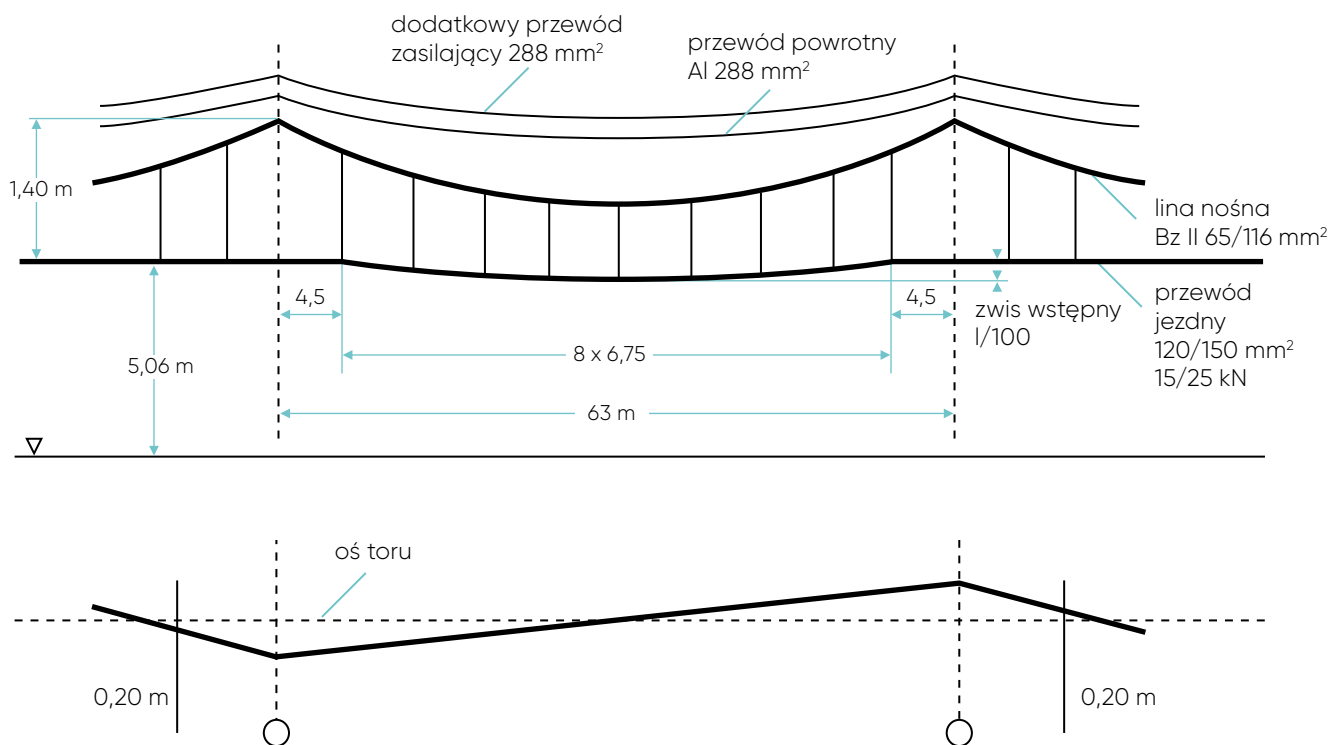
### 2.4.2. Francja (SNCF)

Na pierwszej linii TGV wybudowano sieć trakcyjną o następujących parametrach elektrycznych i mechanicznych:

- napięcie zasilania 25 kV 50 Hz,
- lina nośna o przekroju  $65 \text{ mm}^2$  wykonana z brązu,
- siła naciągu liny 14,0 kN,
- przewód jezdny o przekroju  $120 \text{ mm}^2$  z krzemo-brązu naciągnięty siłą 14,0 kN,
- linka uelastyczniająca o długości 15 m z brązu o przekroju  $35 \text{ mm}^2$  i naciągu 4,00 kN,
- długość przęsła normalnego - 63 m,
- odległość między wieszakami - 4,5 m,
- oddzielne kotwienie krańcowe liny nośnej i przewodu jezdnego,
- lina wzmacniająca stalowo-aluminiowa o przekroju  $288 \text{ mm}^2$ ,
- lina uszynienia grupowego Al/St o przekroju  $288 \text{ mm}^2$ ,
- wstępny zwis przewodu - 1/1000,
- prędkość maksymalna - 260 km/h,
- maksymalny pobór mocy przez elektryczne zespoły trakcyjne wynosił 14 MW.

Na pozostałych liniach TGV zrezygnowano z linki uelastyczniającej. Na liniach 2, 3 i 4 zastosowano przewód jezdny o przekroju  $150 \text{ mm}^2$  naciągnięty z siłą 20,0 kN.

Na linii 5 zastosowano przewód jezdny o przekroju  $150 \text{ mm}^2$  naciągnięty siłą 25,0 kN oraz linę nośną o przekroju  $116 \text{ mm}^2$  wykonaną z brązu BzII. Naciąg liny nośnej - 20,0 kN. Wieszaki wykonano z linki z brązu BzII o średnicy  $12 \text{ mm}^2$ . Maksymalna dopuszczalna rozpiętość przęsła nie zmieniła się. Osuw przewodu jezdnego wynosi  $\pm 200 \text{ mm}$ . Wysokość konstrukcyjna - 1,4 m. Wysokość zawieszenia sieci trakcyjnej jest stała i wynosi 5,08 m. Wstępny zwis przewodu zmniejszono do 1/2000 długości przęsła zawieszenia. Maksymalna prędkość jazdy pod tą siecią wynosi 350 km/h. Dodatkowy przewód zasilający wykonany jest z liny Al/Fe  $288 \text{ mm}^2$ . W systemie zasilania istnieje jeszcze przewód zasilająco-powrotny wykonany również z liny Al/Fe  $288 \text{ mm}^2$ . Przewód zasilający i zasilająco-powrotny są mocowane do konstrukcji wsporczych na wysokości co najmniej 5,6 m licząc od płaszczyzny wyznaczonej przez główki szyn.



Rys. 2.9. Sieć jezdna typu TGV na linii od 2 do 5. [21]

### Obliczenie całkowitego przekroju i ciężaru sieci jezdnej

Dla 1 linii sumaryczne pole przekrojów poprzecznych miedzianych przewodów sieci  $S_{\text{suma}}$  wynosi:

$$S_{\text{sumaCu}} = 65 + 120 = 185 \text{ mm}^2$$

Sumaryczne pole przekrojów poprzecznych Al/St przewodów sieci  $S_{\text{suma}}$  wynosi:

$$S_{\text{sumaAl}} = 288 + 288 = 576 \text{ mm}^2$$

Sumaryczna masa jednego metra części miedzianych przewodów sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$\text{Masa}_{\text{cu}} = 0,56 + 1,070 = 1,630 \text{ kg/m}$$

Sumaryczna masa jednego metra części Al/Fe przewodów sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$\text{Masa}_{\text{al}} = 2 * 1,163 = 2,326 \text{ kg/m}$$

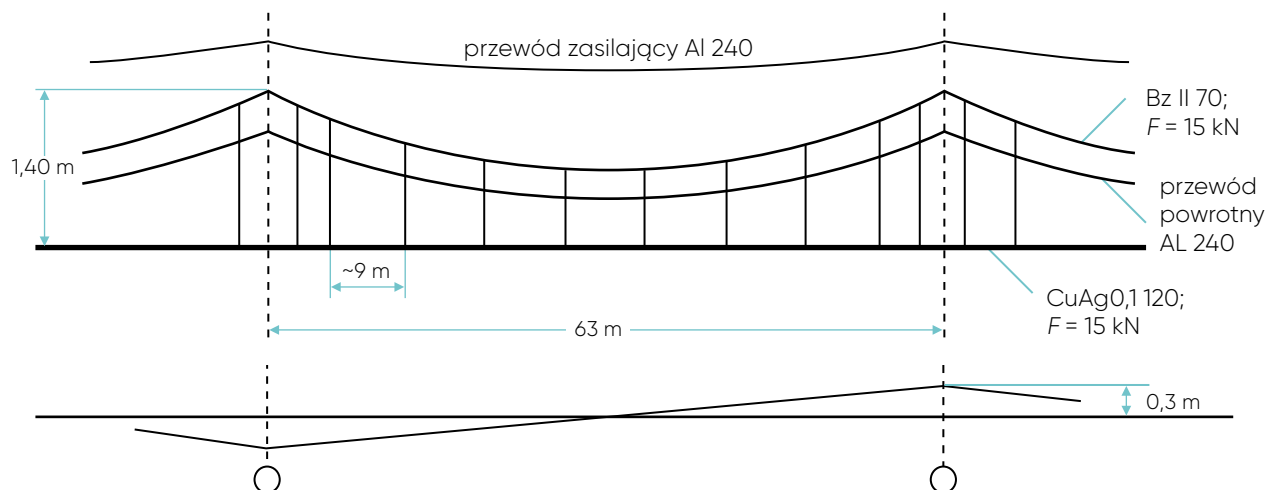
Sumaryczna masa jednego metra sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$\text{Masa}_{\text{c}} = 1,630 + 2,326 = 3,956 \text{ kg/m}$$

### 2.4.3. Hiszpania

Sieci trakcyjne stosowane w Hiszpanii zasilane napięciem  $2 \times 25 \text{ kV } 50 \text{ Hz}$ , to sieci łańcuchowe o jednej linii nośnej i jednym przewodzie jednym. Sieć ta na linii Madryt – Sewilla, oddana została do użytku w 1992 r. Cechuje się następującymi parametrami:

- przewód jezdny o przekroju  $120 \text{ mm}^2$ , naciągnięty siłą  $15 \text{ kN}$ ,
- lina nośna Bz II o przekroju  $70 \text{ mm}^2$ , naciągnięta siłą  $15 \text{ kN}$ ,
- wysokość konstrukcyjna –  $1,4 \text{ m}$ ,
- bez uelastycznienia pod słupami,
- maksymalna rozpiętość przęsła  $63 \text{ m}$ ,
- dodatkowy przewód zasilający i powrotny, każdy po  $240 \text{ mm}^2 \text{ Al}$ .



Rys. 2.10. Sieć jezdna typu EAC-350 na linii Madryt – Sevilla [19]

#### Obliczenie całkowitego przekroju i ciężaru sieci jezdnej

Sumaryczne pole przekrojów poprzecznych miedzianych przewodów sieci  $S_{\text{sumaCu}}$  wynosi:

$$S_{\text{sumaCu}} = 70 + 120 = 195 \text{ mm}^2$$

Sumaryczna masa jednego metra miedzianej przewodów sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$\text{Masa}_{\text{Cu}} = 0,597 + 1,07 = 1,667 \text{ kg/m}$$

Sumaryczne pole przekrojów poprzecznych aluminiowych przewodów sieci  $S_{\text{sumaAl}}$  wynosi:

$$S_{\text{sumaAl}} = 2 \cdot 240 = 480 \text{ mm}^2$$

Sumaryczna masa jednego metra aluminiowych przewodów sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$\text{Masa}_{\text{Al}} = 2 \cdot 0,971 = 1,942 \text{ kg/m}$$

Sumaryczna masa jednego metra sieci jezdnej będzie wynosiła:

$$\text{Masa}_{\text{C}} = 1,942 + 1,667 = 3,609 \text{ kg/m}$$

## 2.5. Uwarunkowania zasilania systemów zasilania trakcji



Zasilanie sieci trakcyjnej w systemie 2 x 25 kV 50 Hz odbywa się w układzie dwufazowym, przy zasilaniu podstacji z układu trójfazowego. Powoduje to niejednakowe obciążenie poszczególnych faz przez podstacje. Nierównomierność obciążenia jest zmienna – zależna od ruchu i mocy pociągów. Powyższe jest przyczyną wprowadzania asymetrii do systemu elektroenergetycznego, które nie może przekraczać 1 %.

Najprostszym rozwiązaniem stosowanym w podstacjach w systemie 2 x 25 kV jest zastosowanie transformatorów jednofazowych. Napięcia wtórne są przesunięte o 180°, co pozwala na uzyskanie napięcia wyjściowego 50 kV. Transformatory jednofazowe wprowadzają asymetrię, której wartość można wyznaczyć z zależności:

$$nps = \frac{S_t}{S_{zw}} \cdot 100\%$$

gdzie:

$S_t$  – moc transformatora;

$S_{zw}$  – moc zwarciowa systemu elektro-energetycznego w punkcie zasilania podstacji.

Przyjmując, że moc transformatora może osiągać wartość 60 MVA, aby asymetria nie przekroczyła 1 %, moc zwarciowa systemu powinna mieć wartość powyżej 6 GVA. Tak wysokie wartości mocy zwarciowej w Polsce osiągane są na poziomie 400 kV i tylko w niewielu punktach systemu elektroenergetycznego na poziomie 220 kV.

Rozwiązaniem pozwalającym na ograniczenie wprowadzania asymetrii jest zastosowanie w podstacjach w systemie 2 x 25 kV transformatorów o układzie Vv lub Yd. Uzwojenie pierwotne tego typu transformatora jest trójfazowe, a wtórne – dwufazowe. Napięcia wtórne w tego typu transformatorach są przesunięte o 120°, co oznacza, że napięcie wyjściowe ma wartość 43,3 kV. Transformatory o układzie Vv lub Yd wprowadzają asymetrię, której wartość można wyznaczyć z zależności:

$$nps = \sqrt{3k^2 - 3k + 1} \cdot \frac{S_t}{S_{zw}} \cdot 100\%$$

W systemie 2 x 25 kV można przyjąć, że uzwojenia wtórne są obciążane jednakowo. Minimalne różnice obciążenia uzwojeń wynikają z faktu zasilania odbiorców nietrakcyjnych z sieci trakcyjnej, czyli z jednego z uzwojeń. Jeżeli na każde uzwojenie wtórne przypada połowa obciążenia całkowitego transformatora, czyli:

$$k = \frac{S_{t1}}{S_t} = \frac{S_{t2}}{S_t} = 0,5$$

gdzie:

$S_t$  – moc transformatora;

$S_{t1}, S_{t2}$  – moc uzwojenia wtórnego;

wówczas:

$$nps = 0,5 \cdot \frac{S_t}{S_{zw}} \cdot 100\%$$

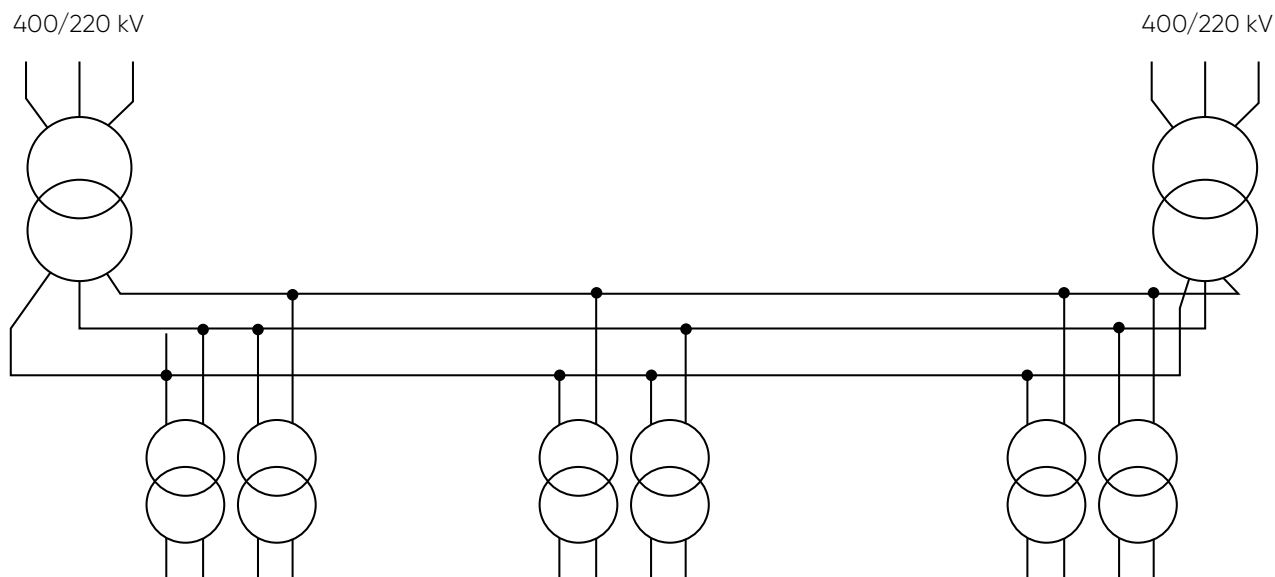
Z powyższego wynika, że aby asymetria nie przekroczyła 1 %, moc zwarciowa systemu powinna mieć wartość powyżej 3 GVA przy transformatorach o mocy 60 MVA. Moc zwarciowa na tym poziomie występuje dla napięć 220 kV i większych.

Rozwiązaniem pozwalającym na ograniczenie oddziaływania na system elektroenergetyczny podstacji, w których są zainstalowane transformatory jednofazowe lub w układzie Vv i Yd, jest zasilanie kilku podstacji z wydzielonej linii WN. W podstacjach tych powinno pracować 3n transformatorów (n = 1, 2, 3...) zasilanych naprzemiennie z różnych faz (Rys. 2.11). Pociągi zasilane są z różnych transformatorów obciążając wszystkie fazy układu elektroenergetycznego. W idealnych warunkach może wystąpić sytuacja, że trzy transformatory zasilane z różnych faz są obciążone takim samym prądem, co pozwala osiągnąć symetryczne obciążenie systemu elektroenergetycznego.

Zastosowanie transformatorów w układzie np. Scott'a, Le Blanc'a, Woodbrige'a lub Roof-Delta pozwala zminimalizować niesymetryczne obciążenie systemu elektroenergetycznego. Asymetria wprowadzana do systemu przy zastosowaniu tego typu transformatorów wynosi:

$$nps = (2k - 1)^2 \cdot \frac{S_t}{S_{zw}} \cdot 100\%$$





**Rys. 2.11. Zasilanie 3n transformatorów z różnych faz wydzielonej linii zasilającej 220 lub 400 kV**

W systemie 2 x 25 kV można przyjąć, że uzwojenia wtórne są obciążane jednakowo, a więc zgodnie z zależnością (3) współczynnik  $k = 0,5$ . Wówczas  $nps \approx 0$ , co pozwala na zasilanie nawet pojedynczych podstacji z układów o stosunkowo małej mocy zwarciowej, występującej na poziomie 110 kV.

Wadą tego rozwiązania jest koszt tego typu transformatorów, których konstrukcja jest skomplikowana. Ponadto fazory napięć wtórnych są przesunięte względem siebie o  $90^\circ$ , co powoduje że w układzie zasilania

są dwa napięcia 25 kV, lecz przesył energii z podstacji do autotransformatorów odbywa się na poziomie około 35,4 kV, a nie 50 kV, co wpływa na maksymalne możliwe odległości między podstacjami ze względu na spadki napięcia w sieci trakcyjnej.

W poniższej tabeli zestawiono dane dotyczące oddziaływania podstacji trakcyjnych na system elektroenergetyczny – wprowadzanie asymetrii, przy założeniu mocy transformatorów  $S_t = 60$  MVA.

UKŁAD POŁĄCZEŃ	PRZESUNIĘCIE NAPIĘĆ	NAPIĘCIE WYJŚCIOWE	WSPÓŁCZYNNIK ASYMETRII (X 100 %)	MINIMALNA MOC ZWARCIOWA	NAPIĘCIE ZASILANIA
Jednofazowy	$180^\circ$	55 kV	$S_t/S_{zw}$	6 GVA	220 lub 400 kV
Vv, Yd	$120^\circ$	47,6 kV	$0,5 \times S_t/S_{zw}$	3 GVA	220 lub 400 kV
Scott'a, Le Blanc'a, Woodbrige'a, Roof-Delta	$90^\circ$	39,9 kV	$\approx 0$		od 110 kV

**Tabela 1. Typy transformatorów w podstacjach trakcyjnych w systemie 2 x 25 kV AC**

## 2.6. Zestawienie podstawowych parametrów systemów zasilania 3 kV DC i 2 x 25 kV AC i sieci trakcyjnych



W poniższych tabelach zestawiono podstawowe parametry oraz wymagania stawiane przez systemy zasilania

trakcyjnej 3 kV DC i 2 x 25 kV AC oraz sieciom trakcyjnym w tych systemach.

PARAMETR/WYMAGANIE	3 kV DC	2 X 25 kV AC
Zasilanie	dwustronne	jednostronne
Napięcie wyjściowe podstacji	3,3 kV	od 39,9 do 55 kV
Odległość między podstacjami	10 – 25 km	20 – 70 km
Kabiny sekcyjne	Pomocniczo w przybliżeniu w połowie odcinka zasilania lub lokalizacji wynikającej z układu sieci	Niezbędne, co 10 – 15 km
Moc podstacji	8 – 23 MW, przeciętnie 11,22 MW	20 – 120 MVA
Moc autotransformatorów	-	10 – 15 MVA
Napięcie zasilania	15 – 110 kV	(110), 220, 400 kV
Asymetria	brak	W zależności od typu transformatorów
Zajętość terenu przez obiekty zasilania	75 – 330 m <sup>2</sup> /km linii	>180 m <sup>2</sup> /km linii
Moce pojazdów (mechaniczne) możliwe do zasilania w systemie	6 MW	20 MW

**Tabela 2. Parametry i wymagania systemów zasilania 3 kV DC i 2 x 25 kV AC**

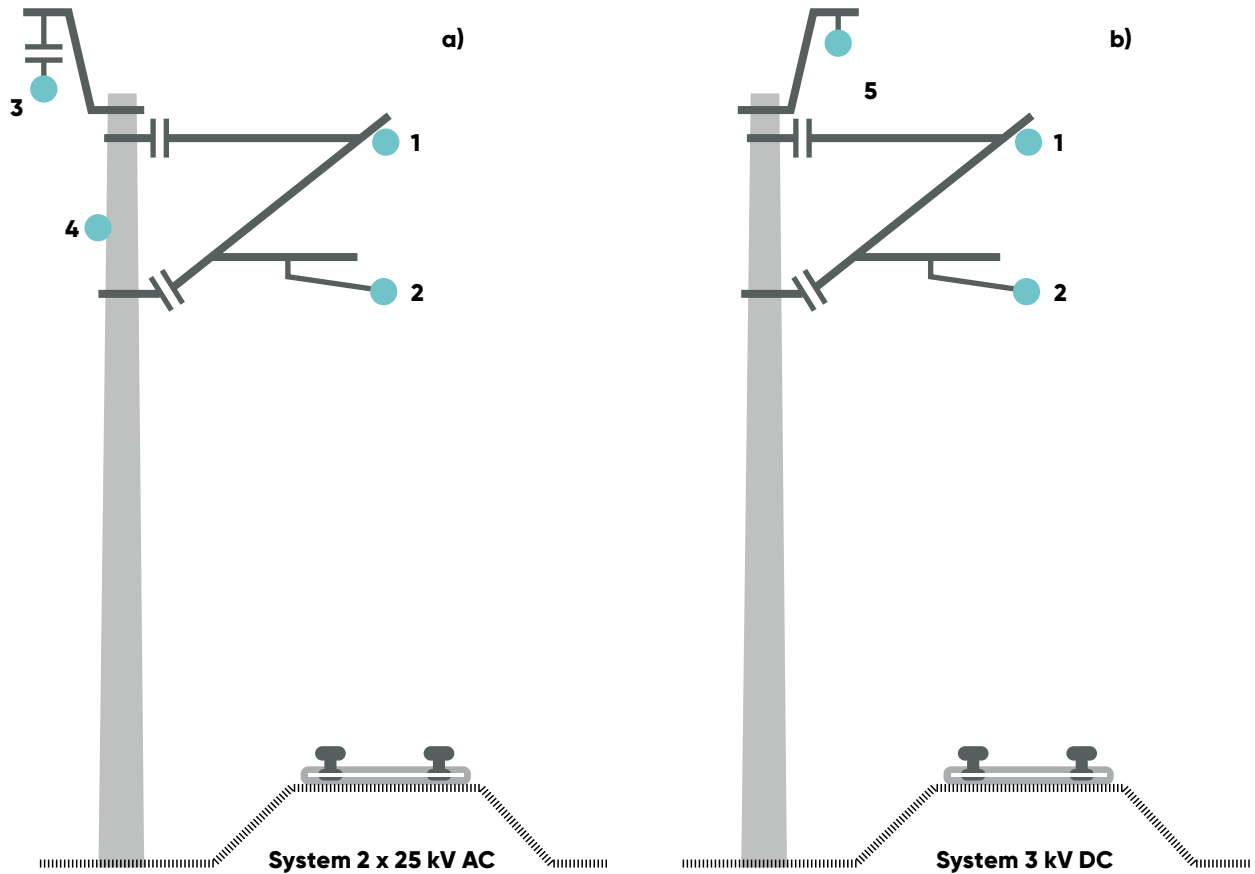
SIEĆ	SUMARYCZNY PRZEKRÓJ POPRZECZNY	SUMARYCZNA MASA SIECI	DŁUGOŚĆ PRZĘŚLA	SYSTEM ZASILANIA	MAKSYMALNA PRĘDKOŚĆ JAZDY
	[mm <sup>2</sup> ]	[kg/m]	[m]		[km/h]
2C120-2C-3	440 Cu	3,90	65/62	3 kV DC	250 – przy jeździe pociągu z jednym pantografem
FR5AV	540 Cu	4,79	-	3 kV DC	
„Direttissima”	620 Cu	5,55	60	3 kV DC	
FR25AV	270 Cu+450 Al.	4,22	60	2x25 kV AC	300
TGV	Suma=720	3,96	63	25 kV AC	260/300
Lina Madryt-Sevilla	185 Cu+576 Al	3,61	63	2x25 kV AC	200/300

**Tabela 3. Zestawienie parametrów rozpatrywanych sieci trakcyjnych**

## Porównanie systemów zasilania kolejowej sieci trakcyjnej

Porównując budowę sieci trakcyjnej stosowanej w systemie 3 kV DC i 2 x 25 kV AC należy zwrócić uwagę, że w systemie AC na konstrukcjach wsporczych, oprócz

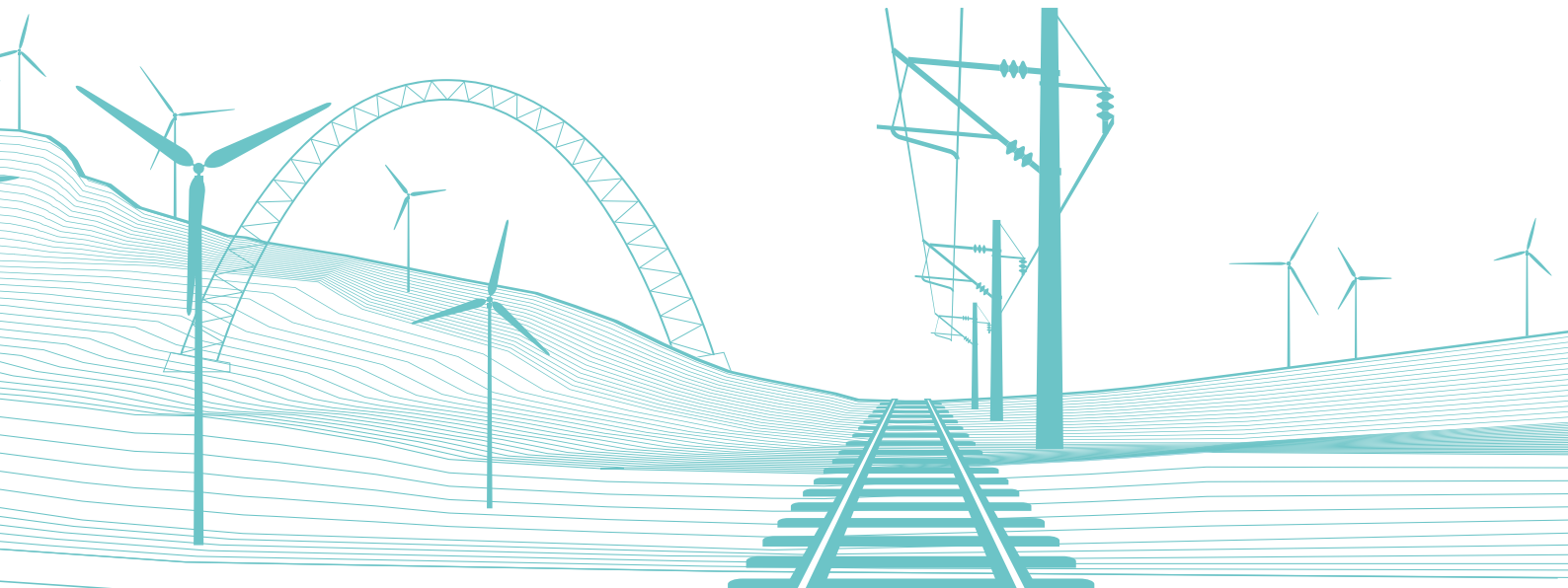
przewodów jezdnych i lin nośnych, zainstalowane są również inne elementy sieci trakcyjnej. Różnice te obrazuje rysunek 2.12.



**Rys. 2.12.** Przykładowe rozmieszczenie na słupie elementów sieci trakcyjnej:

**a)** w systemie – 2 x 25 kV;  
**b)** w systemie – 3 kV DC.

1 – lina nośna;  
2 – przewód jezdny;  
3 – zasilacz dodatkowy;  
4 – przewód ochronny;  
5 – lina uszynienia grupowego [18]



## Wpływ rodzaju zasilania na możliwe do uzyskania prędkości, przyspieszenia pociągów i czasy przejazdu dla ruchu towarowego oraz pasażerskiego

Osiągnięcie przez pociągi zakładanych parametrów ruchowych, w tym prędkości jazdy i przyspieszenia uwarunkowane jest możliwością poboru z sieci trakcyjnej wymaganej ilości energii elektrycznej. Zarówno przyspieszenia, jak i prędkość jazdy mają podstawowy wpływ na czasy przejazdów oraz oddziałują na przepustowość linii kolejowych.

Przesyłanie energii z sieci trakcyjnej do pociągu odbywa się przez styk nakładek pantografu z przewodami jezdnyymi sieci jezdnej. Styk ten jest ruchomy, co wynika z poruszania się pociągu, siła docisku obydwu elementów wynosi od kilku do kilkudziesięciu niutonów, a powierzchnia tego styku jest bardzo mała – zależna od okrągłego kształtu przewodu jezdnego i jego zużycia oraz stanu i wymiarów nakładek stykowych. Powoduje to prawdopodobieństwo powstawania łuku elektrycznego pomiędzy przewodem jezdny i nakładką stykową. Występowanie łuku przyczynia się do przyspieszenia zużycia obydwu tych elementów, a w skrajnych przypadkach może doprowadzić do przepalenia przewodów jezdnych.

Prawdopodobieństwo występowania łuku elektrycznego rośnie wraz ze spadkiem jakości styku – małej siły docisku, występowaniem zanieczyszczeń, wody i lodu itp. Rośnie ono również wraz ze wzrostem prędkości jazdy oraz prądu pobieranego przez pociąg z sieci trakcyjnej. Doświadczenia w Polsce oraz innych krajach europejskich, w tym Włoch, wykazały, że ze względu na powyższe, maksymalna prędkość jazdy pociągów zasilanych w systemie 3 kV DC to około 250 km/h, a moc pobierana przez jeden pantograf nie powinna przekraczać około

7,5 MW (odpowiada to pojazdowi o mocy około 6 MW wraz zasilaniem odbiorów nietrakcyjnych). Ograniczenia te dotyczą wszystkich rodzajów pociągów. Teoretycznie lekkie pociągi o mocy do 2 MW obsługujące ruch lokalny i aglomeracyjny mogłyby poruszać się z większymi prędkościami, lecz w tych rodzajach ruchu nie jest to praktykowane z uwagi na częste zatrzymania na stacjach i przystankach.

W systemie 25 kV AC prąd pobierany przez pociąg jest ponad ośmiokrotnie mniejszy przy tej samej mocy pociągu. Pozwala to na prowadzenie ruchu z większymi prędkościami – ponad 250 km/h, a ograniczeniem jest tylko współpraca mechaniczna nakładek stykowych pantografu z siecią jezdną.

W każdym systemie elektrycznym, w tym systemie zasilania trakcji elektrycznej, podczas przepływu prądu występują spadki napięcia. Spadki te są wprost proporcjonalne do rezystancji obwodu i przepływającego prądu. W systemie 3 kV DC rezystancja sieci trakcyjnej jest ponad dwukrotnie mniejsza niż w systemie 2 x 25 kV AC. Dodatkowo w systemie AC na spadki napięcia wpływ ma indukcyjność sieci – pomijalna w systemach DC. Z drugiej strony prąd przepływający przez sieć trakcyjną w systemie 2 x 25 kV AC jest ponad ośmiokrotnie mniejszy niż w systemie 3 kV DC. Również spadki napięcia pozostałych elementów systemu zasilania (podstacjach trakcyjnych, liniach zasilających itd.) w systemie 2 x 25 kV AC są niższe niż w przypadku 3 kV DC. Szczegółowe porównanie tych systemów pod tym względem przedstawiono w punkcie 5 niniejszego opracowania.

Im napięcie zasilające pociąg jest niższe w stosunku do wartości napięcia znamionowego systemu, tym pobór prądu z sieci trakcyjnej jest większy, co powoduje zwiększenie spadków napięcia. Proces ten trwa do chwili osiągnięcia granicy obciążalności prądowej urządzeń w pojeździe trakcyjnym lub/i zadziałania zabezpieczeń przeciążeniowych w pojeździe lub w podstacji trakcyjnej. W przypadku braku działania zabezpieczeń przeciążeniowych, gdy pociąg pobiera maksymalny prąd, z uwagi na obciążalność jego układów, utrzymanie wymaganej mocy nie jest już możliwe, a jej spadek związany jest z wartością napięcia w sieci trakcyjnej.

Obniżone napięcie w sieci trakcyjnej wpływa na charakterystyki trakcyjne pociągu – zmniejszenie siły pociągowej, co przekłada się na możliwe do osiągnięcia przyspieszenia i może mieć wpływ na osiąganą prędkość maksymalną.

Aby uniknąć nadmiernych spadków napięcia w systemie zasilania, zgodnie z normą EN 50388 [4], przywołanej w TSI Energia [20], pojazdy o mocy powyżej 2 MW powinny być wyposażone w układy redukujące prąd (moc) w przypadku spadku napięcia w sieci trakcyjnej. Zakres redukcji prądu pokazano na rysunku 3.1.

Współczynnik  $a$  na rysunku 3.1 dla systemów 3 kV DC i 25 kV AC wynosi 0,9. Oznacza to, że w przypadku spadku napięcia na pantografie poniżej 2700 V w systemie 3 kV DC lub 22,5 kV w systemie 25 kV AC pojazd powinien redukować prąd pobierany z sieci trakcyjnej.

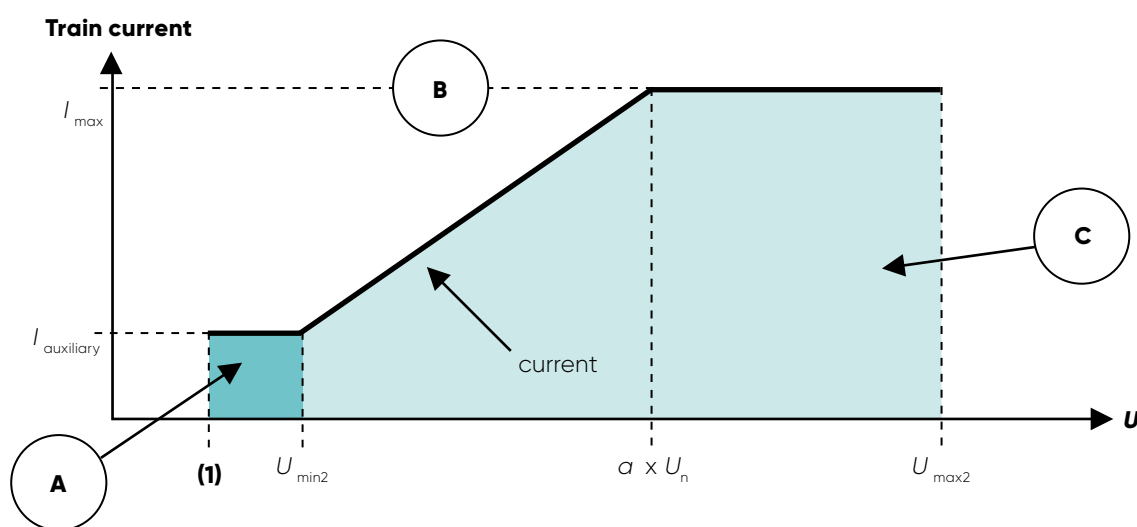
W systemie 3 kV DC występują większe spadki napięć niż w systemie 2 x 25 kV AC oraz zakres dopuszczalnych spadków w systemie DC jest mniejszy. Powoduje to większe prawdopodobieństwo wystąpienia konieczności

ograniczania prądu (mocy) pociągu niż w przypadku systemu 2 x 25 kV AC. Na konieczność redukcji prądu (mocy) szczególnie są narażone pociągi o dużej mocy, czyli towarowe oraz pasażerskie w ruchu międzyregionalnym. Konieczność redukcji prądu (mocy) pociągów może również wystąpić w systemie 2 x 25 kV AC, jednak z mniejszym prawdopodobieństwem niż w systemie 3 kV DC.

Rodzaj systemu zasilania nie ma wpływu na przypięcia pociągów oraz ich prędkość w przedziale do 250 km/h, niezależnie od rodzaju pociągu, pod warunkiem, że podczas jazdy pociągów, napięcie w sieci trakcyjnej nie będzie obniżać się poniżej napięcia znamionowego.

Rodzaj zasilania ma wpływ na czas jazdy tylko przypadku przekroczenia 250 km/h. Ta prędkość jest bowiem graniczna dla systemu 3 kV DC.

System 3 kV DC jest bardziej podatny, niż system 2 x 25 kV AC, na spadki napięcia, czego konsekwencją jest większe prawdopodobieństwo konieczności redukcji prądu (mocy) pociągów, szczególnie dużej mocy, czyli w ruchu towarowym i pasażerskim międzyregionalnym. Redukcja prądu (mocy) przekłada się na przyspieszenia pociągów i możliwość nieosiągnięcia prędkości maksymalnej, co z kolei przełoży się na czas przejazdu. Jeżeli system zasilania zapewnia napięcie znamionowe w sieci trakcyjnej podczas realizowanego rozkładu jazdy, wówczas jego rodzaj nie ma wpływu na możliwe do uzyskania prędkości (do 250 km/h) i przyspieszenia pociągów, czasy przejazdu dla ruchu towarowego oraz pasażerskiego lokalnego, aglomeracyjnego, regionalnego i międzyregionalnego.



**Rys. 3.1. Ograniczanie prądu pojazdu trakcyjnego:** A – brak poboru prądu trakcyjnego; B – obszar redukcji prądu; C – dopuszczalny pobór prądu maksymalnego;  $U_{min2}$ ,  $U_n$ ,  $U_{max2}$  – zgodnie z EN 50163:2004 [4]

# Porównanie charakterystyk trakcyjnych lokomotyw i EZT o rozruchu oporowym i tranzystorowym IGBT

4



W przedstawionym materiale przedstawiono próbę porównania parametrów energetycznych pociągów:

- lokomotywa elektryczna z silnikami prądu stałego z rozruchem rezystorowym vs. lokomotywa elektryczna z silnikami asynchronicznymi z rozruchem falownikowym
- „klasyczny” elektryczny trójczłonowy zespół trakcyjny vs. nowoczesny elektryczny zespół trakcyjny (ezt) podobnej konfiguracji.

Pojazdy, które wybrano do porównania to:

- lokomotywa ET22 produkcji PAFAWAG Wrocław
- nowoczesna sześciosiowa lokomotywa z silnikami asynchronicznymi, o parametrach mechanicznych zbliżonych do lokomotywy ET22

- elektryczny zespół trakcyjny EN57 z silnikami prądu stałego LK-470
- nowoczesny zespół trakcyjny z silnikami asynchronicznymi, o parametrach mechanicznych zbliżonych do ezta EN57.

## 4.1. Trasy do symulacji



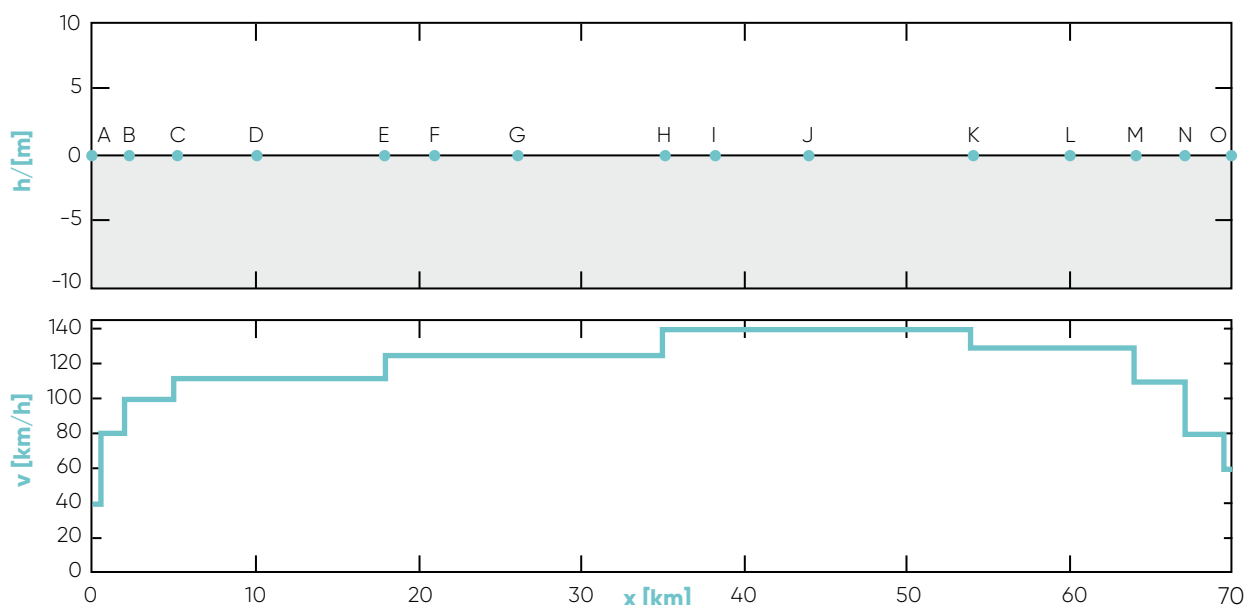
W celu bardziej kompleksowego przedstawienia zagadnienia wykorzystania energii, dla porównywanych pociągów wybrane zostały cztery różne trasy przejazdu. Trasy I i II są odcinkami teoretycznymi, nie występują w warunkach rzeczywistych. Profile tras III i IV zostały opracowane na podstawie parametrów istniejących szlaków kolejowych. Obliczenia symulacyjne w obu kierunków przejazdu zostały wykonane dla tras III i IV.

### Trasa I

Przejazd na trasie poziomej, prostej o długości 20 km, bez zatrzymań i ograniczeń prędkości. Prędkość jazdy jest stała – 120 km/h dla lokomotyw i 110 km/h dla elektrycznych zespołów trakcyjnych.

### Trasa II

Trasa ruchu regionalnego, której parametry określa norma EN 50591:2019 [5]. Rysunek 4.1 przedstawia przykładowy profil typu REGIONAL, zawierający 13 przystanków pośrednich, z różnymi odstępami między stacjami i ograniczeniami prędkości jazdy na linii. Dla każdego przystanku został określony czas postoju, który nie jest brany pod uwagę w przedstawionych symulacjach.



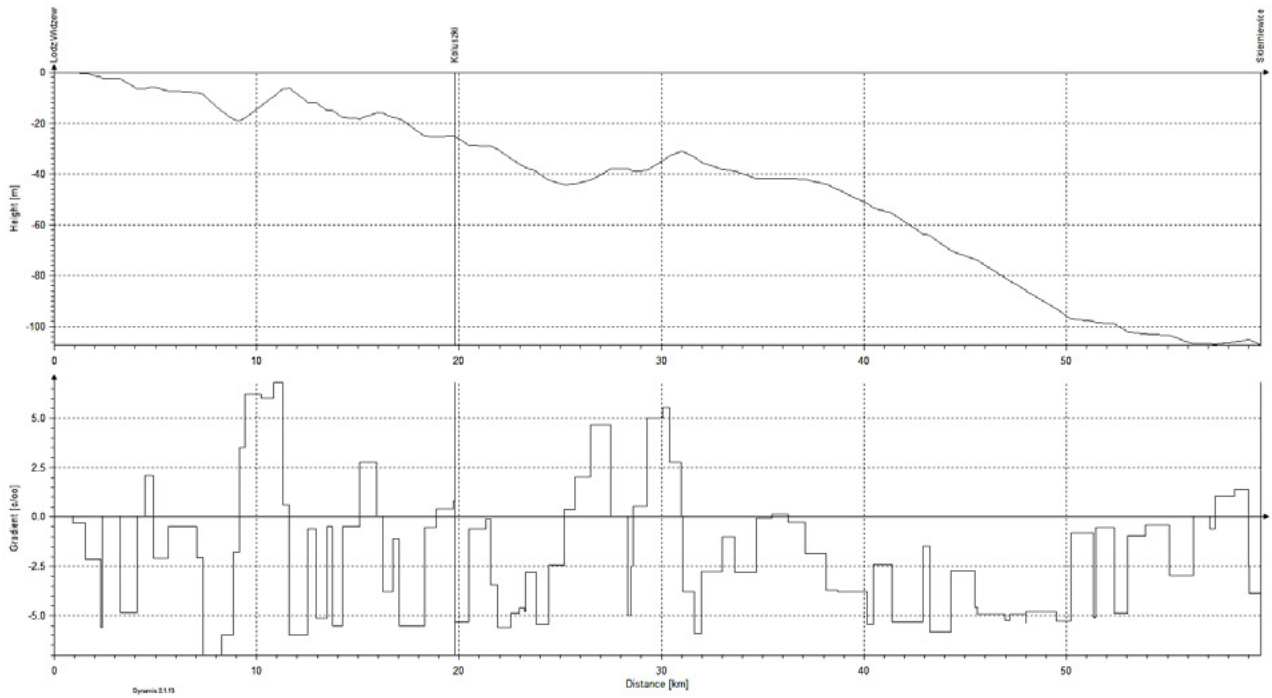
Rys. 4.1. Przykładowy profil typu REGIONAL [5]

## Trasa III

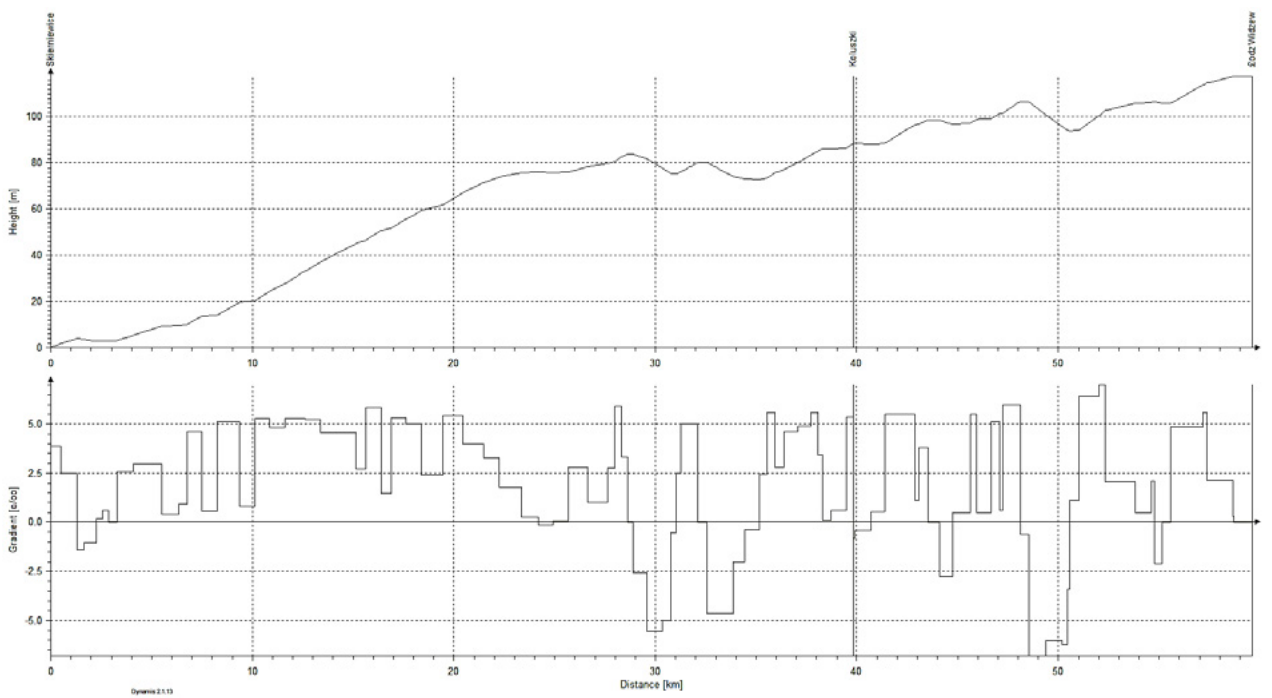
Trasa Łódź Widzew – Skierniewice – Łódź Widzew, zdefiniowana na podstawie materiałów przetargowych Łódzkiej Kolei Aglomeracyjnej [13]. Profil trasy przedstawiono na rysunku 4.2.

## Trasa IV

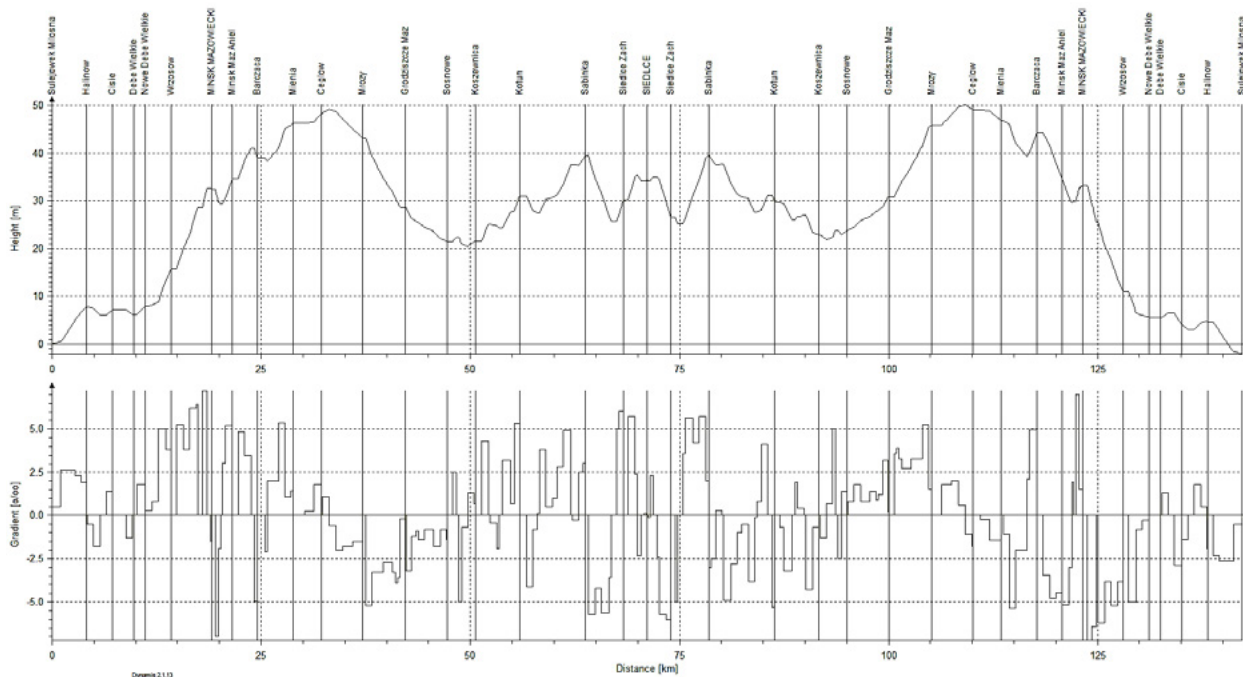
Trasę Sulejówek – Siedlce - Sulejówek, zdefiniowaną na podstawie materiałów przetargowych Kolei Mazowieckich [12]. Profil trasy przedstawiono na rysunku 4.3.



Rys. 4.2a. Profil trasy Łódź Widzew – Skierniewice



Rys. 4.2b. Profil trasy Skierniewice – Łódź Widzew



Rys. 4.3. Profil trasy Sulejówek – Siedlce i Siedlce – Sulejówek

## 4.2. Opis wybranych lokomotyw i elektrycznych zespołów trakcyjnych

### 4.2.1. Lokomotywa ET22

Lokomotywa elektryczna serii ET 22 jest lokomotywą sześćosiową o układzie osi CoCo na prąd stały o napięciu, przeznaczoną do prowadzenia pociągów towarowych. Lokomotywa jest zasilana z sieci prądu stałego o napięciu 3000 V. Podstawowe dane techniczne lokomotywy ET22 są następujące [14]:

- ciężar w stanie służbowym – 120 T,
- prąd mocy ciągłej – 355 A,
- prąd mocy godzinnej – 370 A,
- maksymalny prąd rozruchu (normalny/wysoki) – 600 / 750 A,
- moc lokomotywy ciągła – 3000 kW,
- moc lokomotywy godzinna – 3120 kW,
- moc godzinna na obwodzie kół  $6 \times 520 \times 0,98 = 3060$  kW,
- moc ciągła na obwodzie kół  $6 \times 500 \times 0,98 = 2960$  kW.

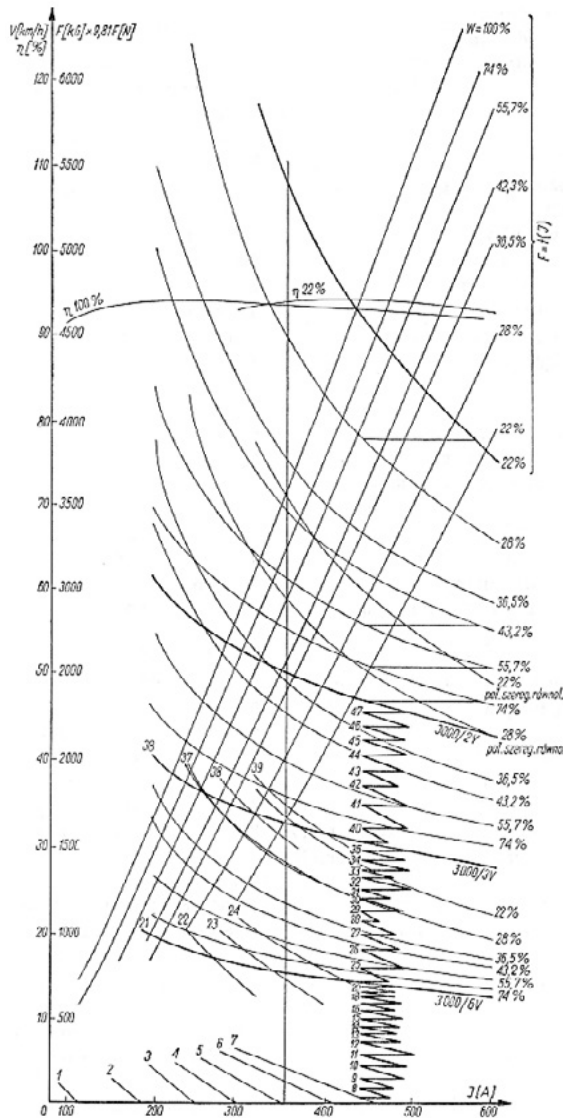
Styczniki liniowe i grupowe lokomotywy ET22 umożliwiają połączenie silników trakcyjnych i rezystorów rozruchowych w trzy następujące konfiguracje:

- połączenie szeregowe, w którym wszystkie silniki trakcyjne są połączone szeregowo w jedną grupę i zasilane poprzez szeregowo połączone sekcje rezystorów rozruchowych;
- połączenie szeregowo-równoległe, w którym silniki trakcyjne są połączone w dwie równoległe gałęzie, każda z nich składa się z trzech silników połączonych szeregowo. Silniki są zasilane poprzez rezystory rozruchowe połączone również w dwie równoległe gałęzie;
- połączenie równoległe, w którym silniki trakcyjne są połączone w trzy równoległe gałęzie, każda z nich składa się z dwóch silników połączonych szeregowo. Sekcje oporników rozruchowych również pracują w układzie trzech równoległych gałęzi.

Każdy z trzech wymienionych układów połączeń umożliwia jazdę na sześciu stopniach bocznikowania obwodów wzbudzenia silników. Osłabienie wzbudzenia silników trakcyjnych umożliwia zwiększenie prędkości jazdy i jest osiągane przez bocznikowanie uzwojeń biegunów głównych rezystorami bocznikowania wzbudzenia. W szereg z tymi rezystorami są połączone boczniki indukcyjne.

Charakterystyki trakcyjne silnika trakcyjnego i lokomotywy przedstawiono na rysunkach 4.4 i 4.5.





Rys. 4.4. Charakterystyka silnika trakcyjnego EE-541b lokomotywy ET 22.

## 4.2.2. Nowoczesna lokomotywa sześćosiowa z silnikami asynchronicznymi

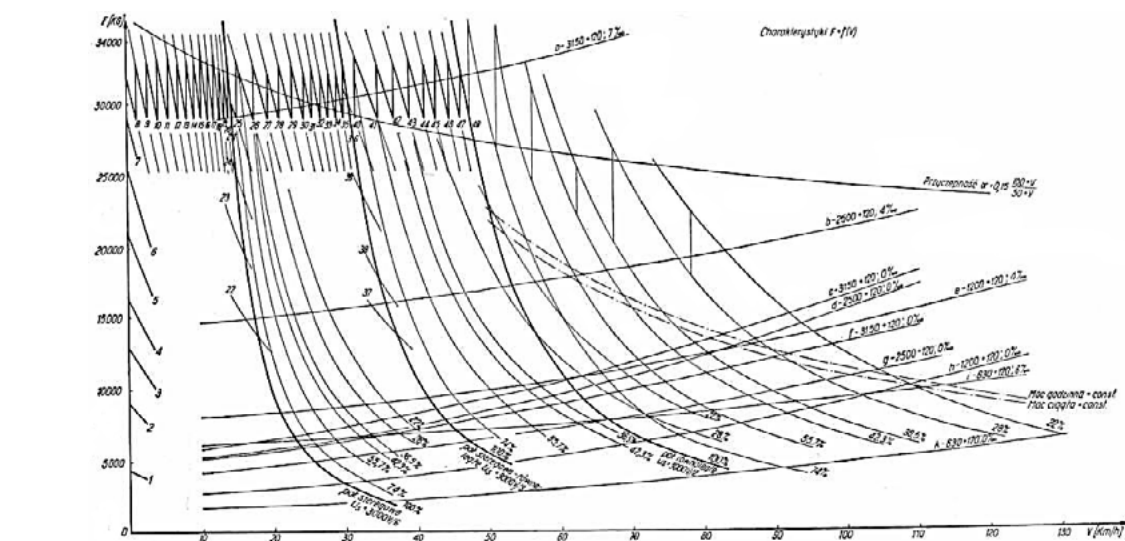
Do obliczeń porównawczych została wybrana przykładowa jednosystemowa lokomotywa elektryczna o takim samym układzie osi jak ET22. Napęd przykładowej lokomotywy stanowią silniki asynchroniczne zasilane przez przekształtniki, zbudowane z tranzystorów IGBT.

Parametry przykładowej lokomotywy przedstawiają się następująco:

- liczba silników – 6,
- napięcie zasilania – 3000 V DC,
- moc ciągła – 5000 kW,
- maksymalna siła pociągowa – 375 – 450 kN,
- maksymalna prędkość eksploatacyjna – 120 km/h.

## 4.2.3. Elektryczny zespół trakcyjny EN57

Elektryczny zespół trakcyjny EN57 składa się z trzech członów: dwóch sterowniczych (Ra i Rb) oraz jednego środkowego członu silnikowego (S).

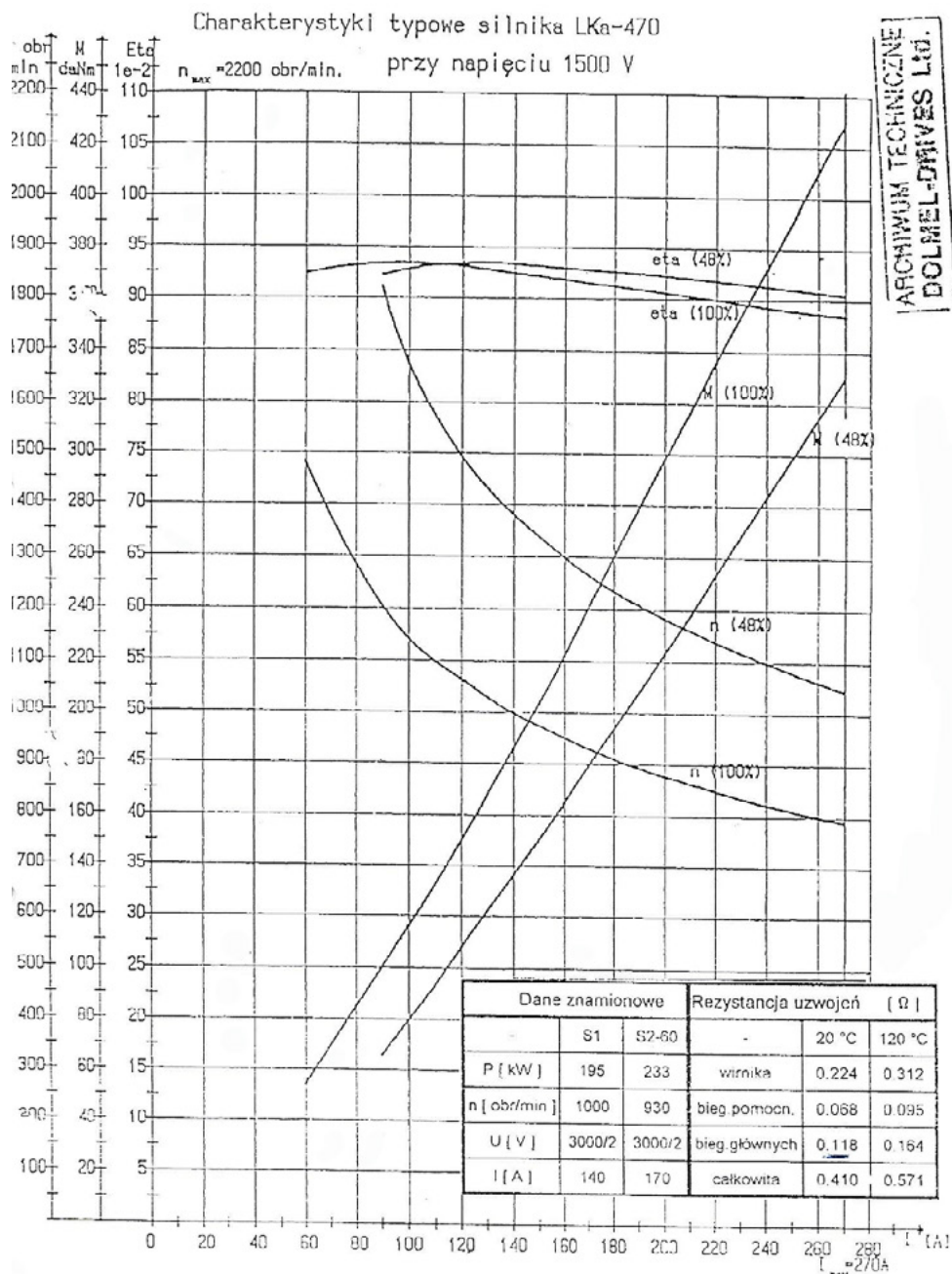


Rys. 4.5. Charakterystyka trakcyjna lokomotywy elektrycznej ET22.

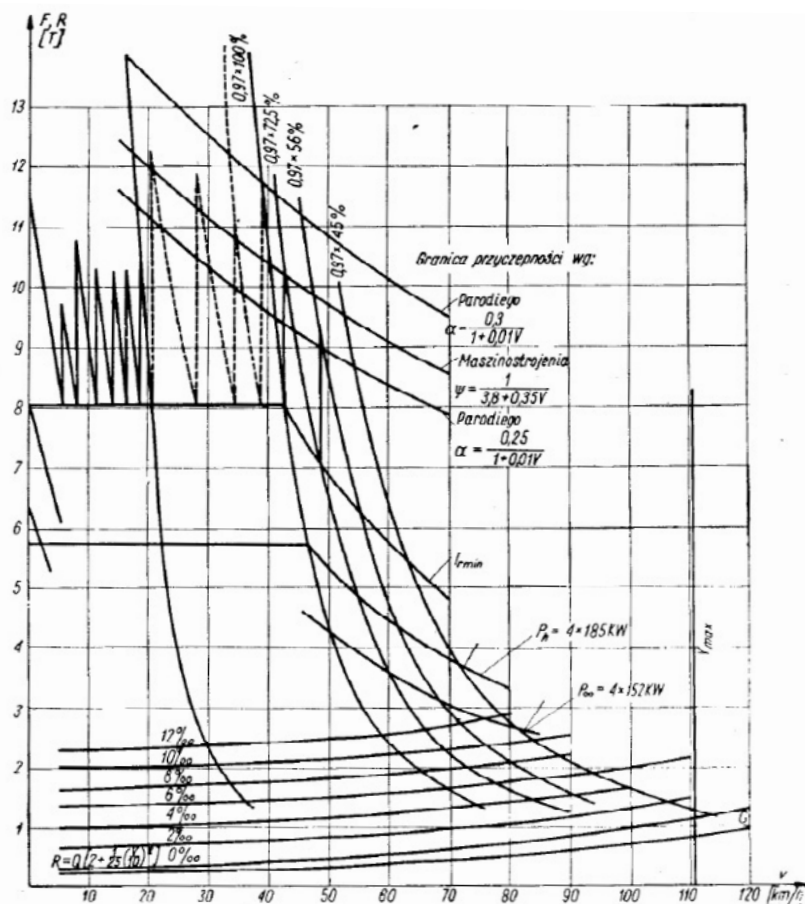
Podstawowe dane techniczne wersji podstawowej EN57 [3]:

- zestawienie wagonów – r + s + r,
- napięcie zasilania – 3000 V DC,
- prędkość maksymalna – 110 km/h,
- masa całkowita – 125 t,
- długość zespołu – 63,97 m,
- moc ciągła – 608 kW,
- moc godzinna – 740 kW,
- typ silnika trakcyjnego – LK450,
- ilość silników trakcyjnych – 4.

Napęd eżt jest zasilany z sieci 3000 V DC, napięciem tym są zasilane cztery silniki trakcyjne (ich rodzaj i moc zależą od wersji zespołu), znajdujące się na osiach wózków napędnych wagonu środkowego. W EN57 zastosowano samoczynny rozruch oporowy. Podobnie jak w lokomotywie ET22, silniki trakcyjne są przełączane w grupach z połączenia szeregowego do połączenia szeregowo-równoległego. W obliczeniach symulacyjnych przyjęto, że EN57 jest wyposażony w silniki LK-470, które mają większą moc niż standardowe silniki LK-450, a są stosowane zamiennie do silników LK-450. Parametry tych silników przedstawiono poniżej. Charakterystyki trakcyjne silnika trakcyjnego i EN57 przedstawiono na rysunkach 4.6 i 4.7.



Rys. 4.6. Charakterystyki silnika Lk-470 [2]



Rys. 1-4. Charakterystyki trakcyjne zespołu  
 $F = f(v)$  oraz  $R = f(v)$ .

### Rys. 4.7. Charakterystyki trakcyjne ezt EN57 [3]

#### 4.2.4. Nowoczesny elektryczny zespół trakcyjny z napędem asynchronicznym

Do obliczeń porównawczych został wybrany przykładowy jednosystemowy ezt o takim samym układzie osi jak EN57. Napęd przykładowego ezt stanowią silniki asynchroniczne zasilane przez przekształtniki, zbudowane z tranzystorów IGBT. Parametry przykładowego elektrycznego zespołu trakcyjnego przedstawiają się następująco:

- napięcie zasilania – 3000 V DC,
- moc znamionowa napędu – 1600 kW,
- prędkość konstrukcyjna – 176 km/h,
- prędkość maksymalna –  $\geq 160$  km/h,
- waga netto – 109 t,
- waga maksymalna – 140 t,
- średnie przyspieszenie dla masy nominalnej od 0 km/h do 40 km/h – 1,0 – 1,2 m/s<sup>2</sup>,
- silniki – 4 x 400 kW (500 kW).

### 4.3. Założenia do analiz

#### 4.3.1. Założenia ogólne

Do porównania sprawności energetycznej lokomotyw i elektrycznych zespołów trakcyjnych przyjęto następujące założenia:

- lokomotywy prowadzą pociąg pasażerski o masie 630 t (15 wagonów 4-osiowych – łożyska toczne, ciężar wagonu 42 t),
- ezt mają taką samą masę, liczbę członów, liczbę osi tocznych /napędnych,
- lokomotywy mają taką samą masę służbową i ilość osi napędnych,
- prędkości są takie same dla obu lokomotyw i obu ezt,
- siły pociągowe w obszarze stałej mocy są takie same dla obu typów lokomotyw i obu typów ezt,
- opory ruchu składu pociągu są takie same dla obu lokomotyw i obu ezt,

- w czasie rozruchu nie występuje poślizg kół napędnych,
- napięcie trakcyj jest stałe i wynosi 3 kV DC, nie uwzględnia się zmian wartości napięcia na pantografie w czasie przejazdu,
- do analizy uwzględnia się tylko moc wykorzystana na cele trakcyjne bez uwzględnienia obwodów pomocniczych lokomotywy i zasilania wagonów pasażerskich,
- pominięto czas postoju na przystankach,
- przy określaniu masy pociągu masy dodatek na masy wirujące uwzględniono w całkowitej masie pociągu,
- symulacje przejazdów wykonano dla parametrów technicznych linii przedstawionych wcześniej, z uwzględnieniem profilu trasy i ograniczeń prędkości,
- w czasie hamowania lokomotywy nie oddają energii do sieci (wyłączona rekuperacja),
- przekładnie trakcyjne mają stały współczynnik sprawności równy 0,97.

Do obliczeń oporów ruchu przyjęto zależności wg Davisa [9].

#### Opory ruchu wagonów:

$$F_{res} = (c_{\text{łoż}} + 0,054 \cdot v) \cdot m_{\text{wag}} \cdot g + 147 \cdot n_{\text{osi}} + (2,5 + n_{\text{wag}}) \cdot c_{\text{wag}} \cdot v^2$$

#### gdzie:

$F_{res}$  – wartość siły oporów ruchu [N]

$m_{\text{wag}}$  – masa wagonów [t]

$n_{\text{osi}}$  – łączna liczba osi wagonów

$c_{\text{łoż}}$  – współczynnik zależny od typu łożysk: dla łożysk tocznych  $c_{\text{łoż}} = 0,652$ ; dla łożysk ślizgowych  $c_{\text{łoż}} = 0,897$

$v$  – prędkość jazdy [m/s]

$n_{\text{wag}}$  – liczba wagonów

$c_{\text{wag}}$  – współczynnik zależny od rodzaju wagonów: dla wagonów towarowych  $c_{\text{wag}} = 1,0$ ; dla wagonów pasażerskich

$c_{\text{wag}} = 1,27$

$g$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>].

#### Opory ruchu lokomotyw:

$$F_{res} = (0,9 + 0,054 \cdot v) \cdot m_{\text{lok}} \cdot g + 147 \cdot n_{\text{osi}} + 4,47 \cdot v^2$$

#### gdzie:

$m_{\text{lok}}$  – masa lokomotywy [t]

$n_{\text{osi}}$  – liczba osi lokomotywy

#### Opory ruchu elektrycznych zespołów trakcyjnych (wg CNTK):

$$F_{res} = (0,65 + 0,054 \cdot v) \cdot m_{\text{ezt}} \cdot g + 147 \cdot n_{\text{osi}} + (2,7 + n_{\text{wag}}) \cdot 1,271 \cdot v^2$$

#### gdzie:

$m_{\text{ezt}}$  – masa obciążonego zespołu trakcyjnego [t]

#### Opory ruchu pociągów na łukach wyznaczone na podstawie zależności Rockla:

$f_{\text{rad}} = 690/R$

#### gdzie:

$f_{\text{rad}}$  – względna wartość siły oporów ruchu podczas jazdy po łuku [N/kN]

$R$  – promień łuku [m]

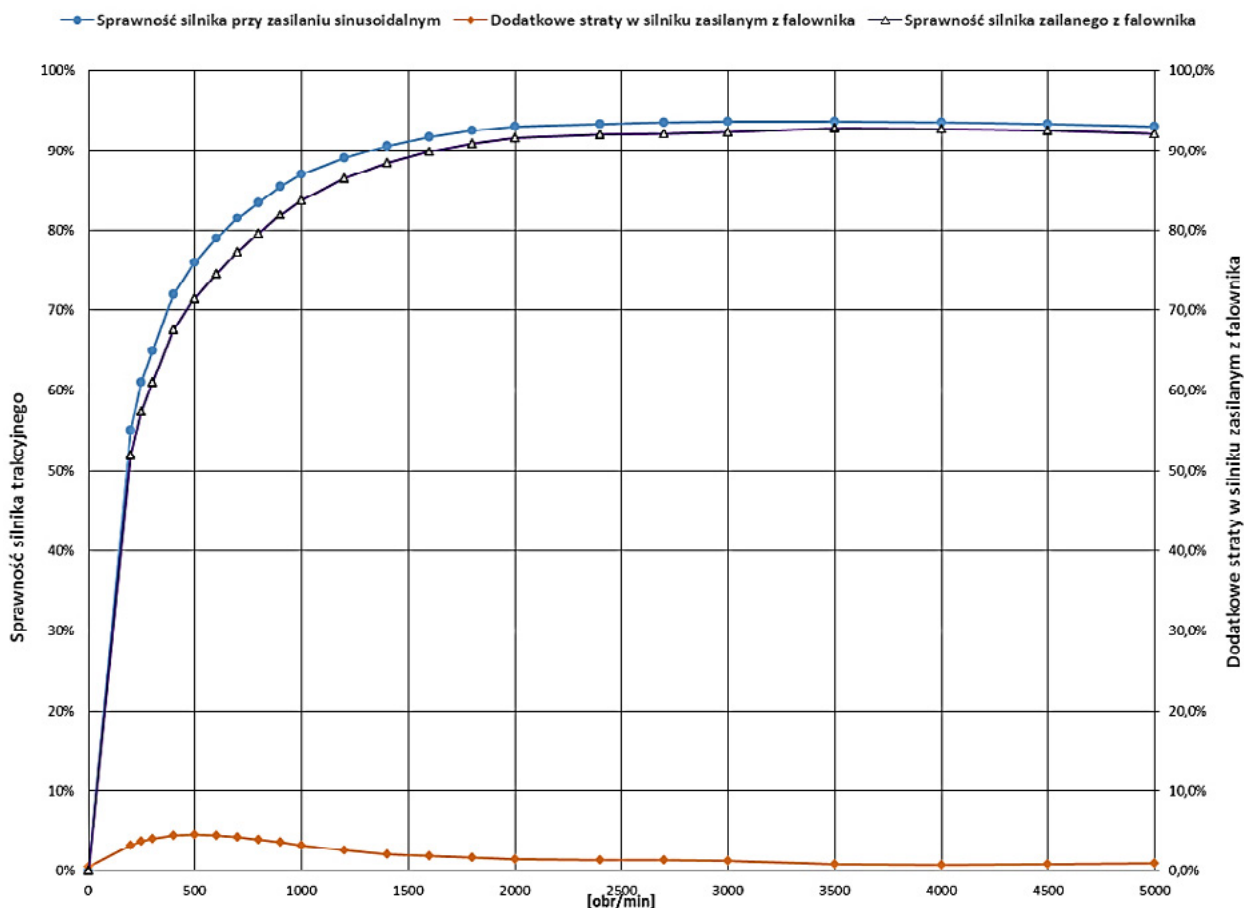
### 4.3.2. Dodatkowe założenia dla symulacji poszczególnych przypadków

Dla lokomotywy ET22 przyjęto, że lokomotywa wykorzystuje maksymalną siłę pociągową dla mocy godzinnej i pracuje z charakterystyką zgodną z danymi technicznymi [15]. Oszacowanie sprawności układu napędowego oparto na analizie mocy obwodu trakcyjnego w zakresie mocy pobieranej przez obwód trakcyjny odniesionej do mocy wynikającej z generowanej siły pociągowej. Moc wejściową wyznaczono jako iloczyn napięcia na pantografie i prądu silników trakcyjnych, odczytanych z charakterystyki lokomotywy. Taki sposób uwzględnia w sposób syntetyczny sprawność silników trakcyjnych oraz sprawność przekładni lokomotywy. Należy tu podkreślić wartość sprawności silników trakcyjnych lokomotywy ET22, która wynosi znamionowo 0,938, zaś odczytany z charakterystyki silnika zakres zmienności tego parametru wynosi 0,910...0,938.

Moc wyjściową całkowitą wyznaczono jako sumę dwóch składników: iloczynu siły pociągowej i aktualnej prędkości pociągu oraz iloczynu siły oporów ruchu i aktualnej prędkości pociągu. W ten sposób uwzględnia się wpływ siły oporów ruchu na aktualną prędkość pociągu, bowiem superpozycja siły pociągowej i siły oporów ruchu daje wynikową siłę, która powoduje przyspieszenie pociągu.

Do celów obliczeniowych wprowadzono charakterystykę siły pociągowej i siły oporów ruchu pociągu w funkcji prędkości. Na tej podstawie można odczytać wartość siły pociągowej i prędkość osiągnięcia krzywej stałej mocy lokomotywy.

W przypadku pociągu prowadzonego lokomotywą nowej generacji, do celów obliczeniowych przyjęto, że lokomotywa nowej generacji ma charakterystykę trakcyjną taką samą jak lokomotywa ET22. Oznacza to, że lokomotywa może nie rozwijać pełnej mocy, jaką dysponuje, jednak takie ograniczenie umożliwia bezpośrednie porównanie parametrów lokomotywy.



Rys. 4.8. Przykładowe wykresy sprawności silnika trakcyjnego zasilanego z falownika

W nowoczesnych pojazdach trakcyjnych w układach napędowych są stosowane zaawansowane rozwiązania energoelektroniczne. Klasyczny układ napędowy – asynchroniczny silnik trakcyjny prądu przemiennego, przekładnia i falownik trakcyjny. Wymagane jest, by układ napędowy miał jak największą sprawność przy minimalnych wymiarach i jak najmniejszej masie. Z tego względu, przy projektowaniu silników i falowników dąży się do zminimalizowania strat, występujących w tych urządzeniach.

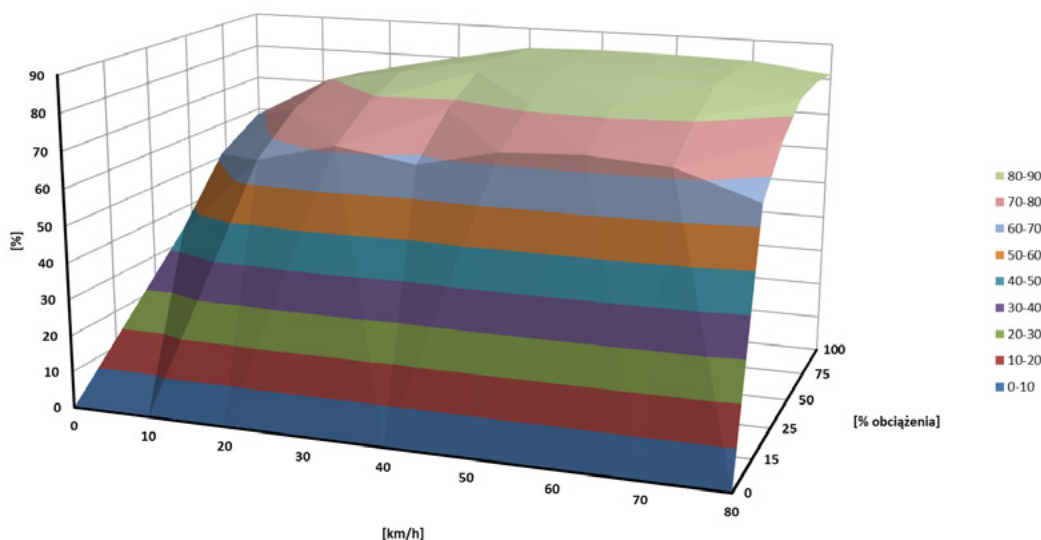
Wyznaczenie wartości strat w falowniku wymaga kompleksowej analizy jego punktów pracy. Falownik trakcyjny zasila silnik lub silniki trakcyjne napięciem przemiennym o zmiennej częstotliwości, tak aby umożliwić płynne przyspieszanie pojazdu bez szarpnięć. W czasie rozruchu silniki pobierają prąd w zakresie od zera do wartości maksymalnej, przy uwzględnieniu zmiennego w czasie obciążenia silnika. W czasie jazdy z prędkością ustaloną silniki trakcyjne pracują ze stałą prędkością obrotową i momentem. Ponadto asynchroniczny silnik trakcyjny, odbiornik lub generator energii elektrycznej charakteryzuje się zmiennym współczynnikiem mocy ( $\cos \varphi$ ), co ma wpływ na obciążenie falownika. W celu zapewnienia poprawnej pracy, zwłaszcza do zapewnienia szybkiego przejścia z trybu pracy silnikowej do pracy prądnicowej, silnik pobiera z falownika prąd magnesujący, o znacznie mniejszej wartości niż prąd znamionowy silnika.

Zmienność wartości obciążenia, częstotliwości i współczynnika mocy silnika w czasie powoduje, że nie jest możliwe wyznaczenie stałej wartości strat w układzie falownika. Ponadto stosowana jest zmienna częstotliwość przełączania elementów półprzewodnikowych, która pozwala na optymalne kształtowanie fali sinusoidalnej prądu, a także ma wpływ na straty przełączania w półprzewodnikowych elementach mocy. Na rysunku 4.8 przedstawiono przykładowe wykresy sprawności silnika trakcyjnego zasilanego z falownika, a na rysunku 4.9 przykładowy wykres sprawności układu napędowego przykładowej lokomotywy w funkcji prędkości jazdy i obciążenia.

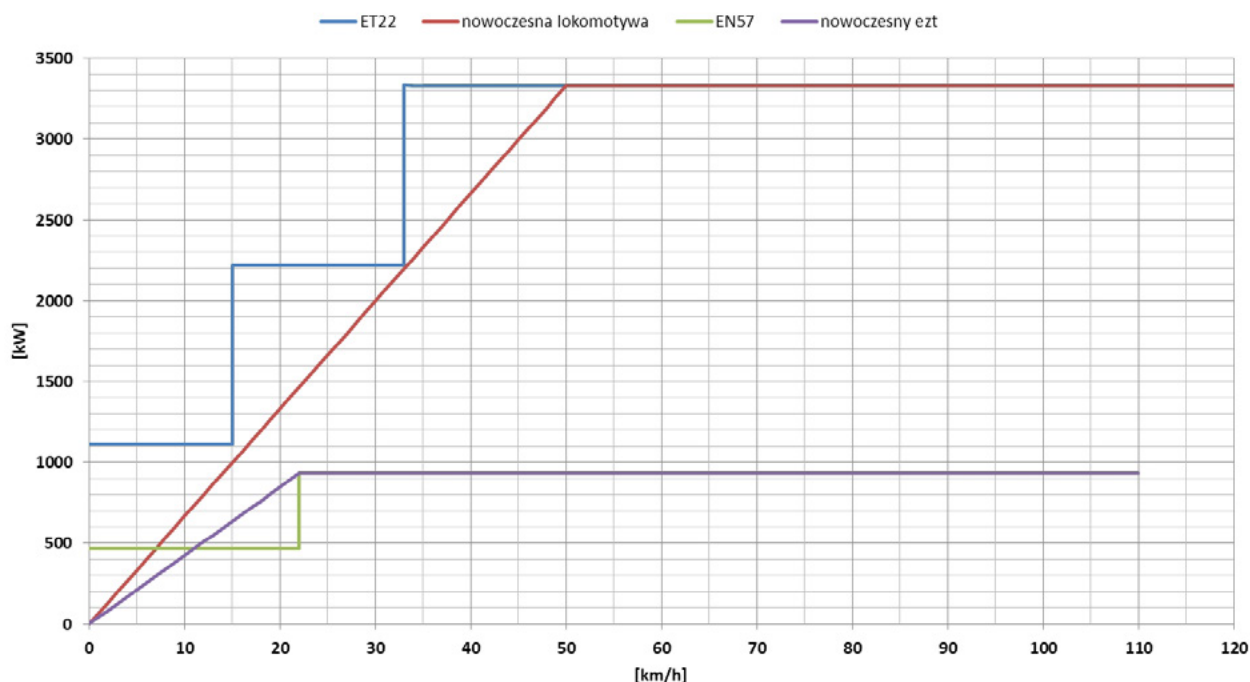
W odróżnieniu od silników prądu stałego, prąd pobierany z sieci w czasie rozruchu przez układ napędowy z asynchronicznymi silnikami trakcyjnymi nowoczesnej lokomotywy czy ezł nie jest uśredniony do wartości stałej, lecz narasta liniowo w funkcji prędkości – do chwili wejścia układu napędowego w obszar pracy ze stałą mocą, co przedstawiono na rysunku 4.10. W związku z tym do obliczeń przyjęto aproksymowaną charakterystykę sprawności w funkcji prędkości obrotowej silnika trakcyjnego i falownika trakcyjnego. Sprawność asynchronicznych silników trakcyjnych jest przedstawiana przez producentów maszyn elektrycznych w postaci tabeli. Sprawności te przedstawiają się następująco:

	PRĘDKOŚĆ 14...18 KM/H	PUNKT STAŁE MOCY (1/V)	PUNKT STAŁEGO POŚLIZGU (1/V <sup>2</sup> )	PRĘDKOŚĆ MAKSYMALNA
<b>SPRAWNOŚĆ</b>	0,83...0,88	0,935...0,947	0,940...0,945	0,933...0,943

Także średnia sprawność falownika przyjmowana do obliczeń wynosi zwykle 0,88...0,90 dla falowników zbudowanych z elementów mocy IGBT.



**Rys. 4.9.** Przykładowy wykres sprawności układu napędowego przykładowej napędu falownikowego w funkcji prędkości jazdy i obciążenia.

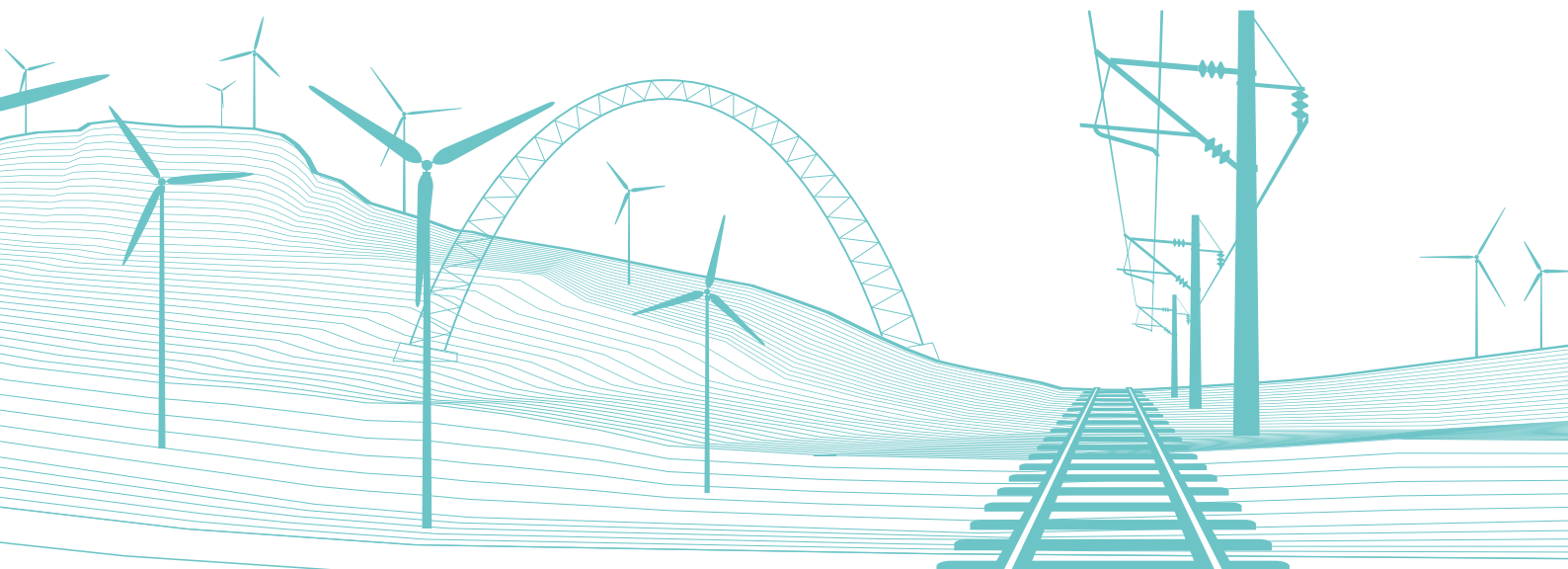


**Rys. 4.10.** Moc pobierana przez lokomotywy i ezt w czasie rozruchu (dla rozpatrywanego przykładu) w funkcji prędkości jazdy

Podobnie jak dla lokomotywy ET22 przyjęto, że EN57 wykorzystuje maksymalną siłę pociągową dla mocy godzinnej i pracuje z charakterystyką zgodną z danymi technicznymi [3], [2]. Oszacowanie sprawności układu napędowego oparto na analizie jak dla lokomotywy ET22. Należy tu podkreślić wartość sprawności silników trakcyjnych ezt EN57, która wynosi znamionowo 0,925, zaś odczytany z charakterystyki silnika zakres zmienności tego parametru wynosi 0,910...0,925.

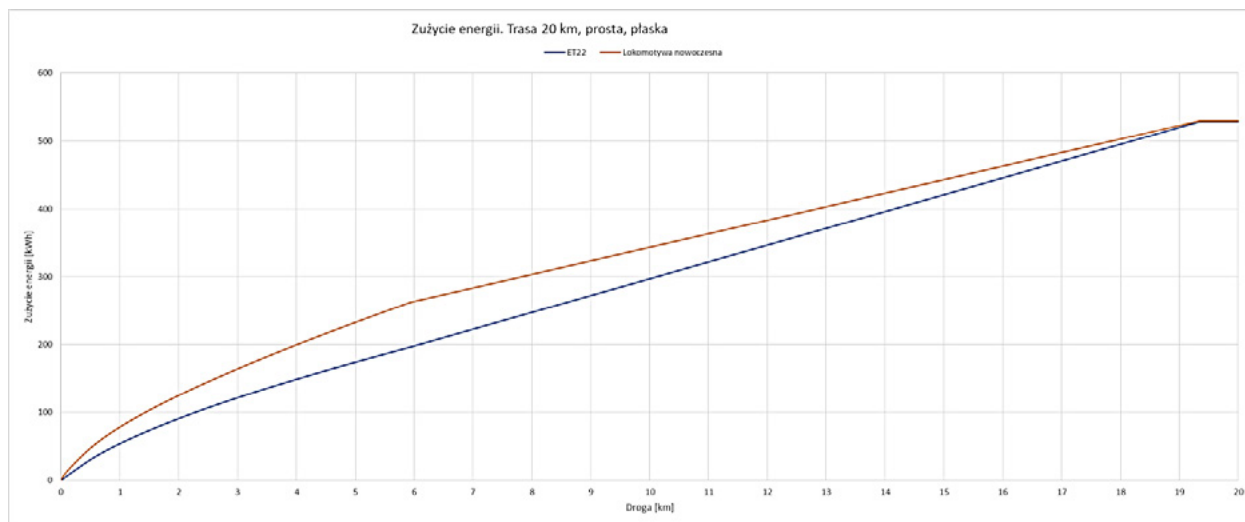
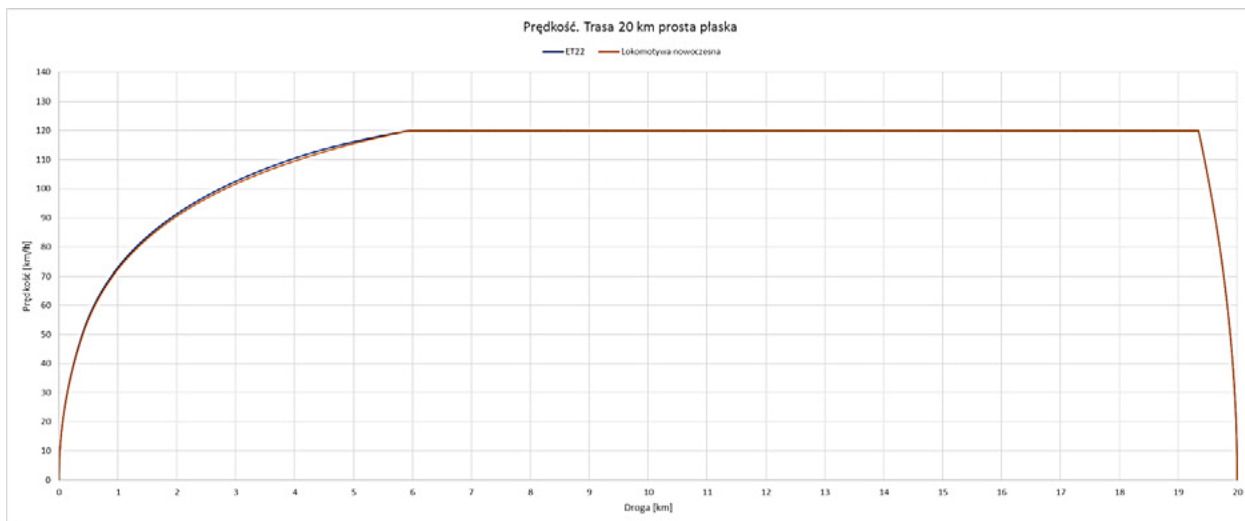
Do celów obliczeniowych przyjęto, że ezt nowej generacji ma charakterystykę taką samą jak ezt EN57. Oznacza to, że nowoczesny ezt może nie rozwijać pełnej mocy, jaką dysponuje, jednak takie ograniczenie umożliwia bezpośrednie porównanie parametrów obu typów ezt. Uwarunkowania pracy napędu nowoczesnego ezt są takie same jak dla nowoczesnych lokomotyw elektrycznych.

Podobnie jak dla lokomotyw, w odróżnieniu od silników prądu stałego, prąd silników trakcyjnych nowoczesnego ezt w czasie rozruchu nie jest uśredniony do wartości stałej, tylko narasta liniowo w funkcji prędkości do chwili wejścia układu napędowego w obszar pracy ze stałą mocą. W związku z tym do obliczeń przyjęto aproksymowaną charakterystykę sprawności w funkcji prędkości obrotowej silnika trakcyjnego i falownika trakcyjnego, co przedstawiono na rysunku 4.9. Sprawność asynchronicznych silników trakcyjnych jest przedstawiana przez producentów maszyn elektrycznych w postaci tabeli. Sprawności te kształtują się w podobnym przedziale jak przedstawione powyżej sprawności dla silników lokomotyw elektrycznych. Także średnia sprawność falownika przyjmowana do obliczeń wynosi zwykle 0,88...0,90 dla falowników zbudowanych z elementów mocy IGBT.



## 4.4. Wyniki obliczeń symulacyjnych dla lokomotyw elektrycznych

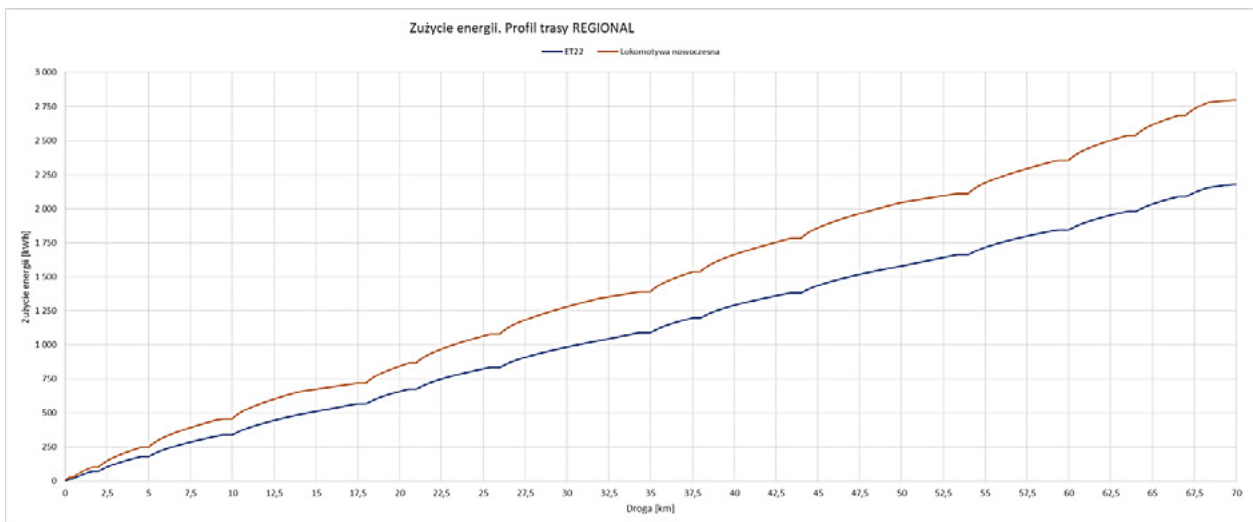
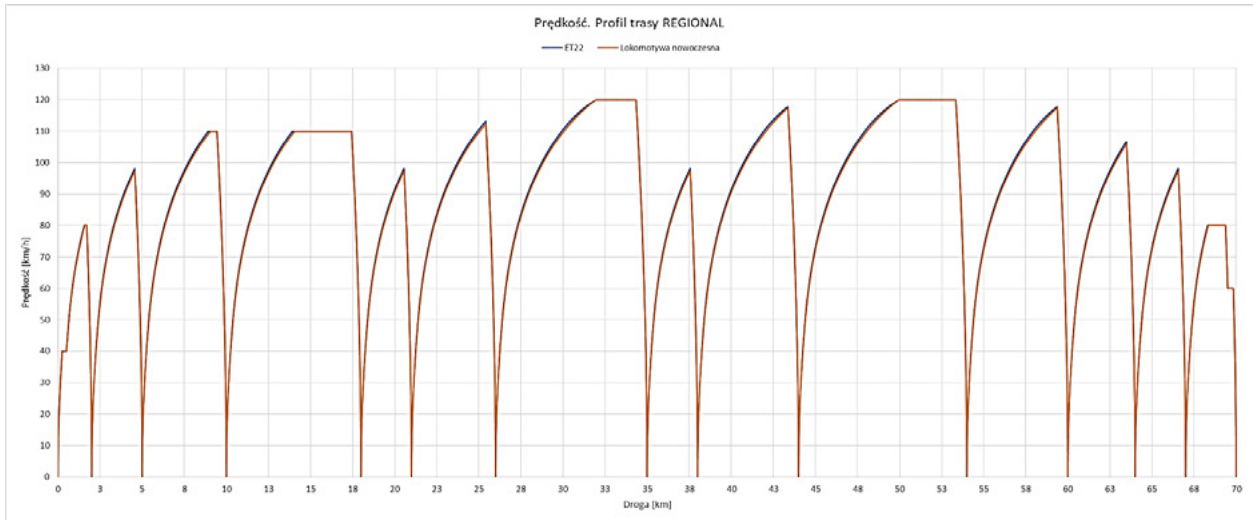
### 4.4.1. Trasa I – przejazd na odcinku poziomym, prostym o długości 20 km.



	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
ET22	20 km	528,5	26,4	20	708
NOWOCZESNA LOKOMOTYWA		529,7	26,5	20	710

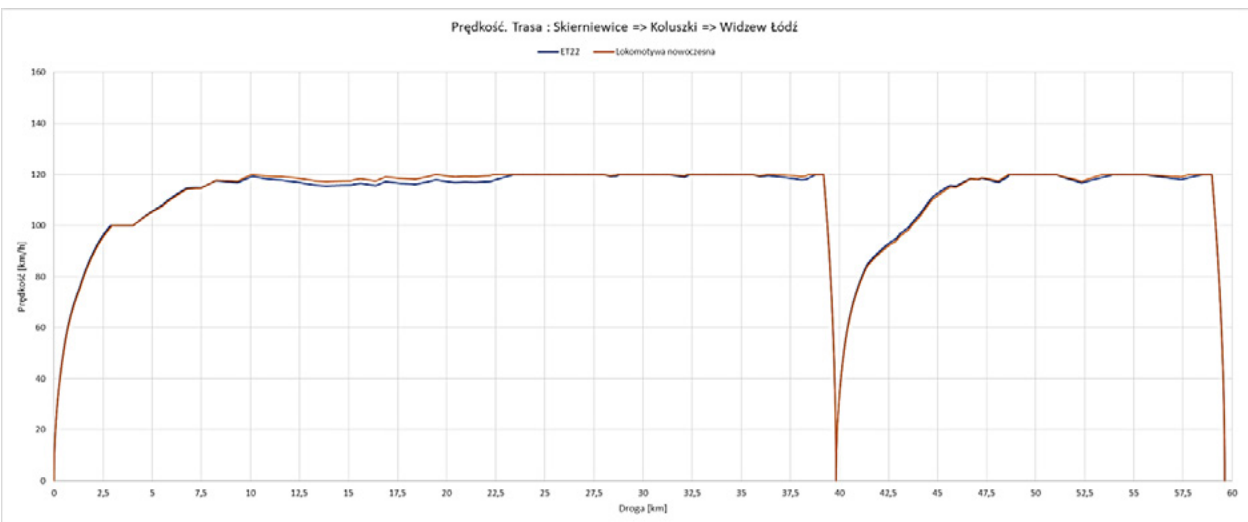
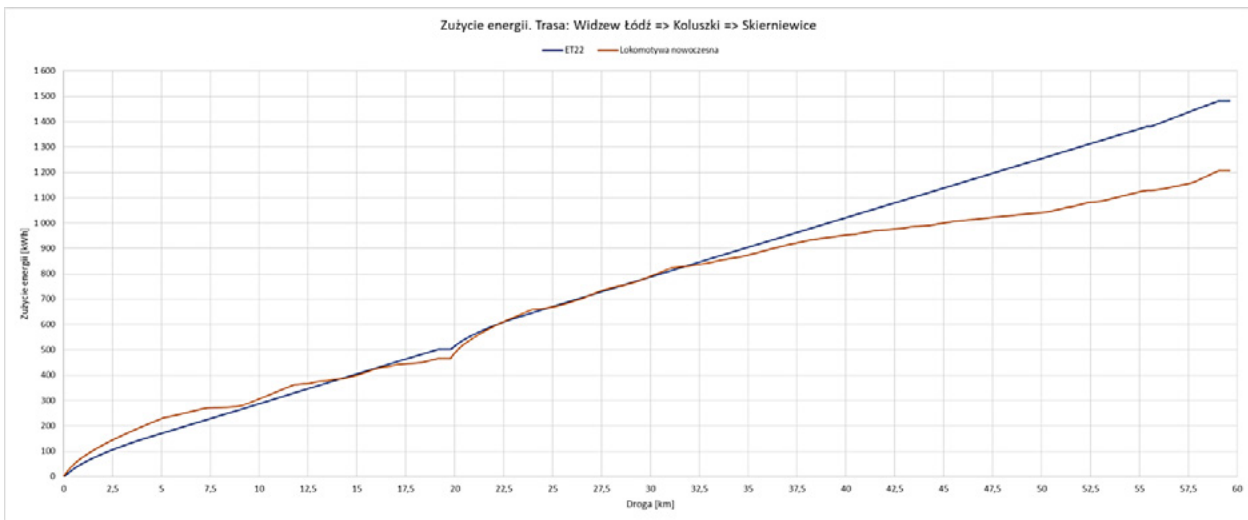
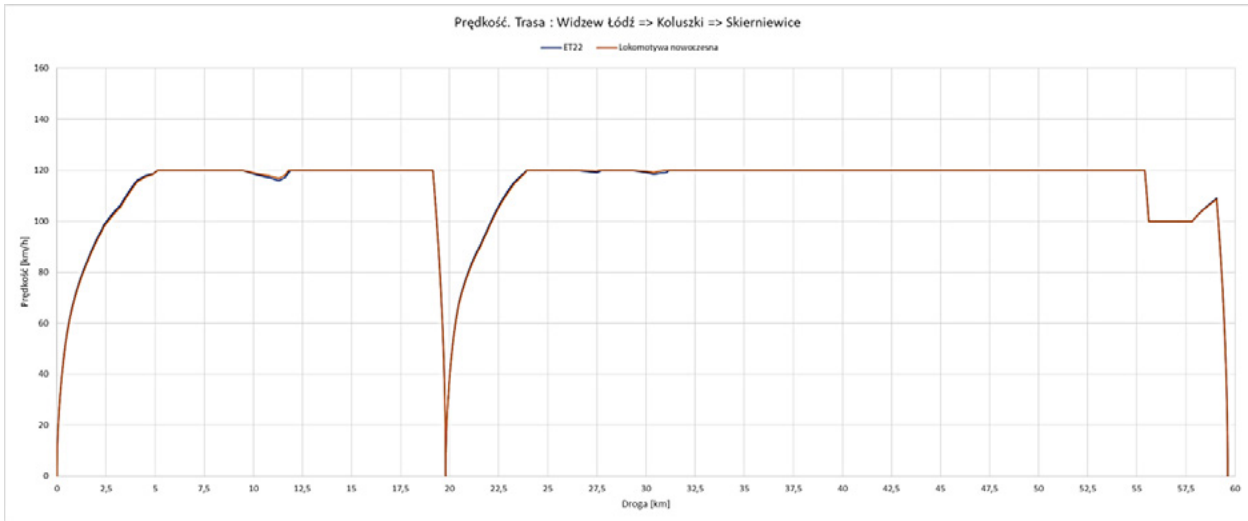


## 4.4.2. Trasa II – profil trasy: REGIONAL

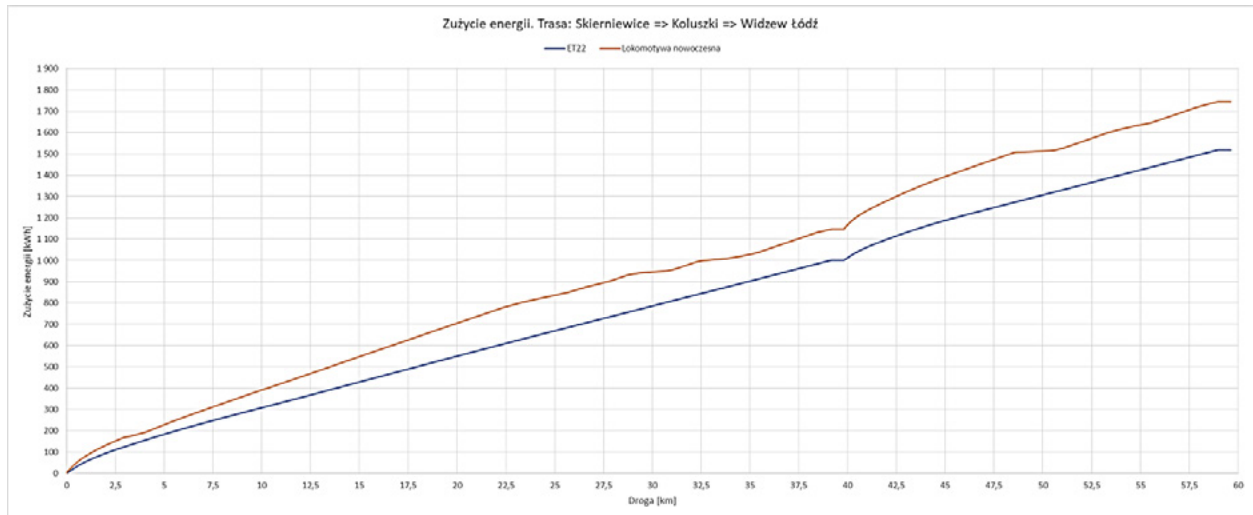


	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
ET22	Trasa REGIONAL	2177,4	31,1	70	3569
NOWOCZESNA LOKOMOTYWA		2797,3	40,0	70	3595

4.4.3. Trasa III – Łódź Widzew – Koluszki – Skierniewice – Koluszki – Łódź Widzew



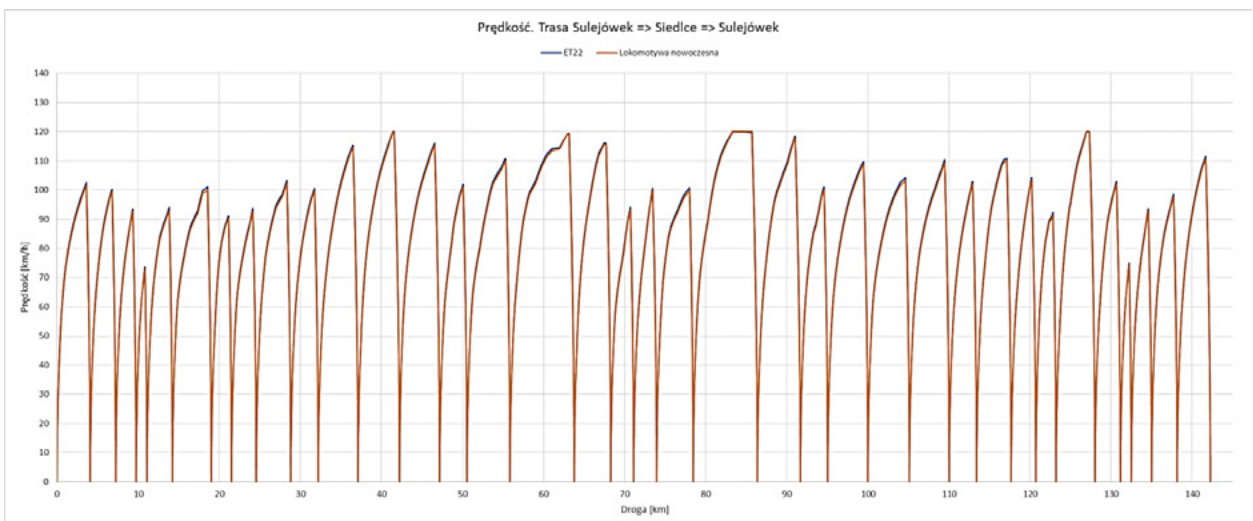
## Porównanie systemów zasilania kolejowej sieci trakcyjnej

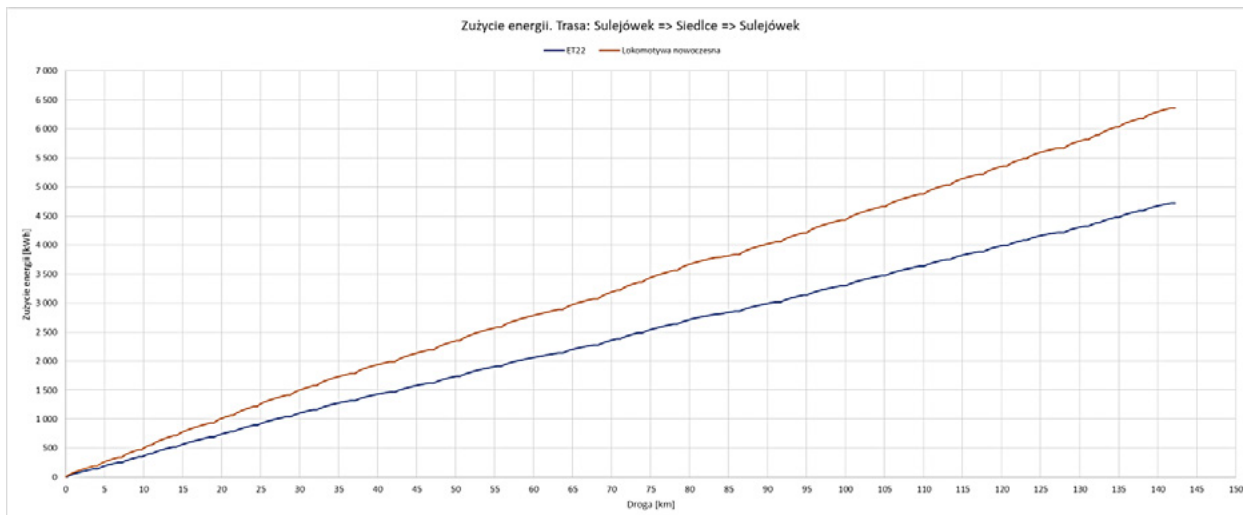


	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
ET22	Widzew Łódź => Koluszki => Skierniewice	1481,0	24,8	59,622	2007
NOWOCZESNA LOKOMOTYWA		1206,4	20,2	59,622	2011

	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
ET22	Skierniewice => Koluszki => Widzew Łódź	1518,5	25,5	59,622	2048
NOWOCZESNA LOKOMOTYWA		1745,0	29,3	59,622	2045

### 4.4.4. Trasa IV – Sulejówek – Siedlce – Sulejówek

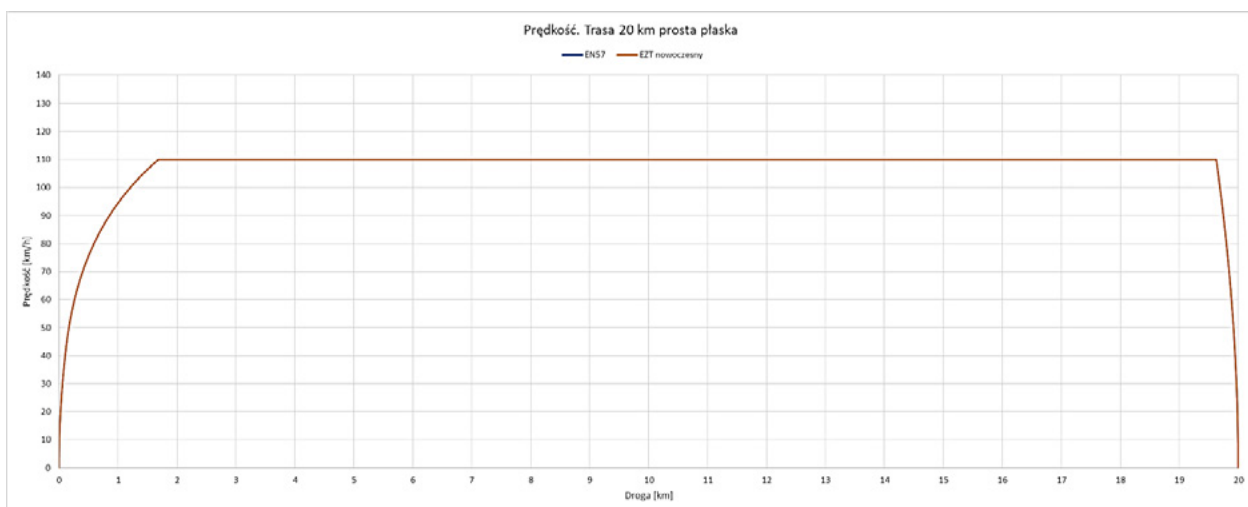


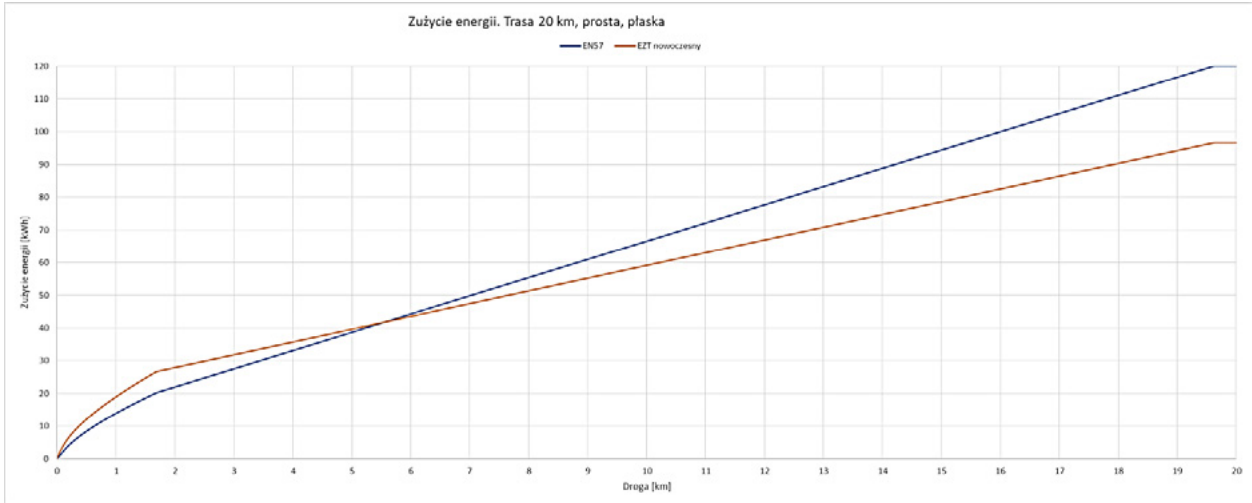


	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
<b>ET22</b>	Sulejów => Siedlce => Sulejów	4722,8	33,2	142,24	7885
<b>NOWOCZESNA LOKOMOTYWA</b>		6360,3	44,7	142,24	7951

## 4.5. Wyniki obliczeń symulacyjnych dla elektrycznych zespołów trakcyjnych

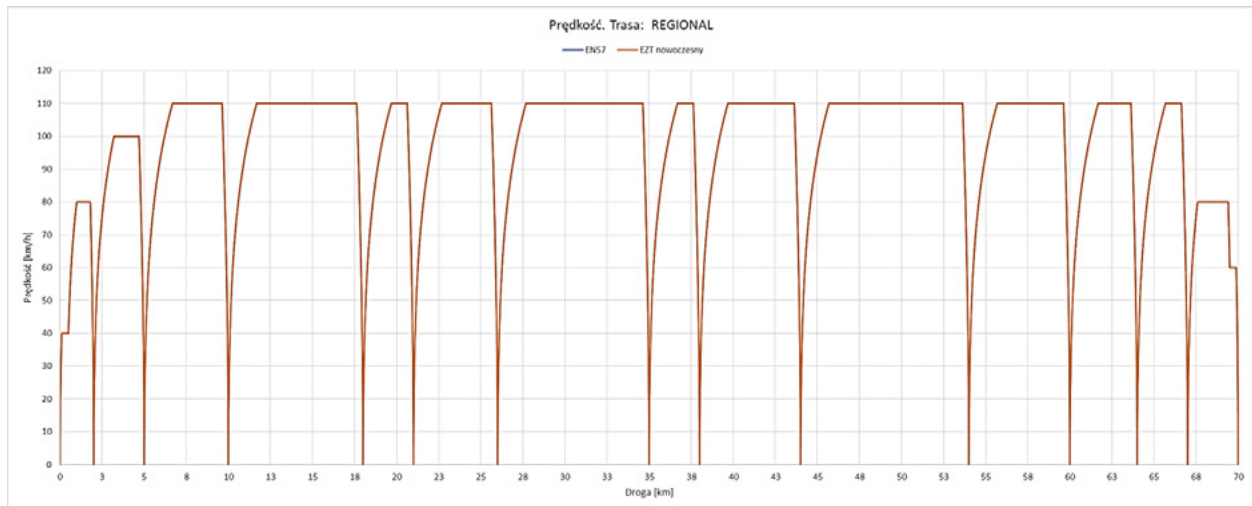
4.5.1. Trasa I – przejazd na odcinku poziomym, prostym o długości 20 km.

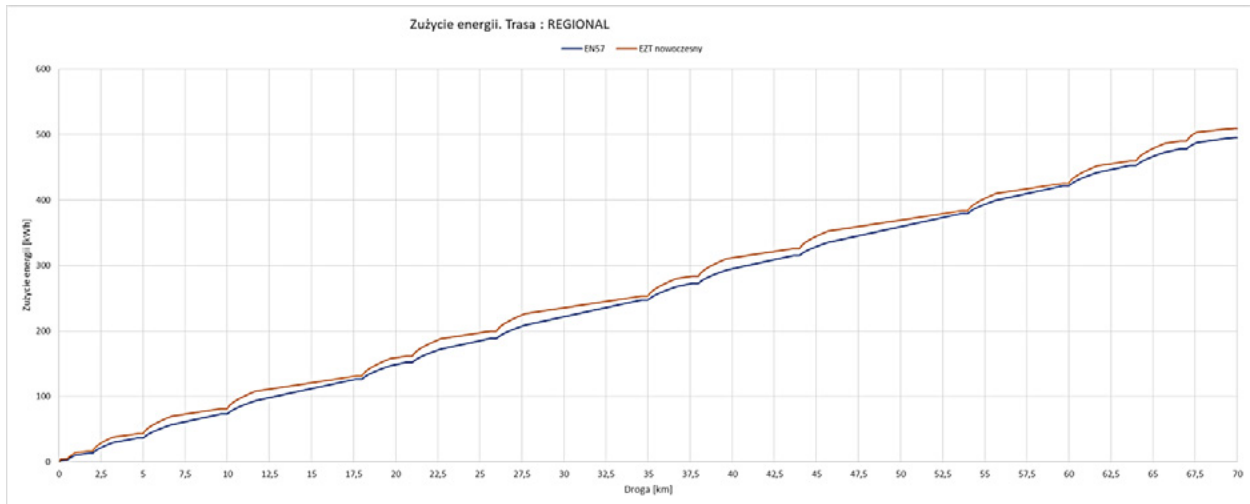




	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
EN57	20 km	120,2	6,0	20	699
NOWOCZESNY EBT		96,7	4,8	20	699

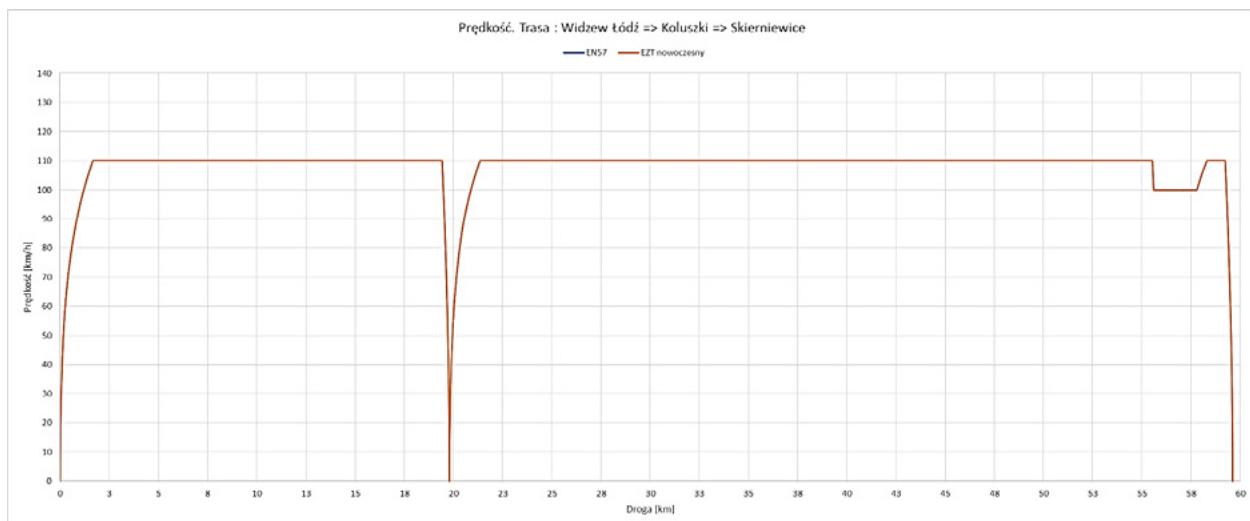
## 4.5.2. Trasa II – profil trasy: REGIONAL



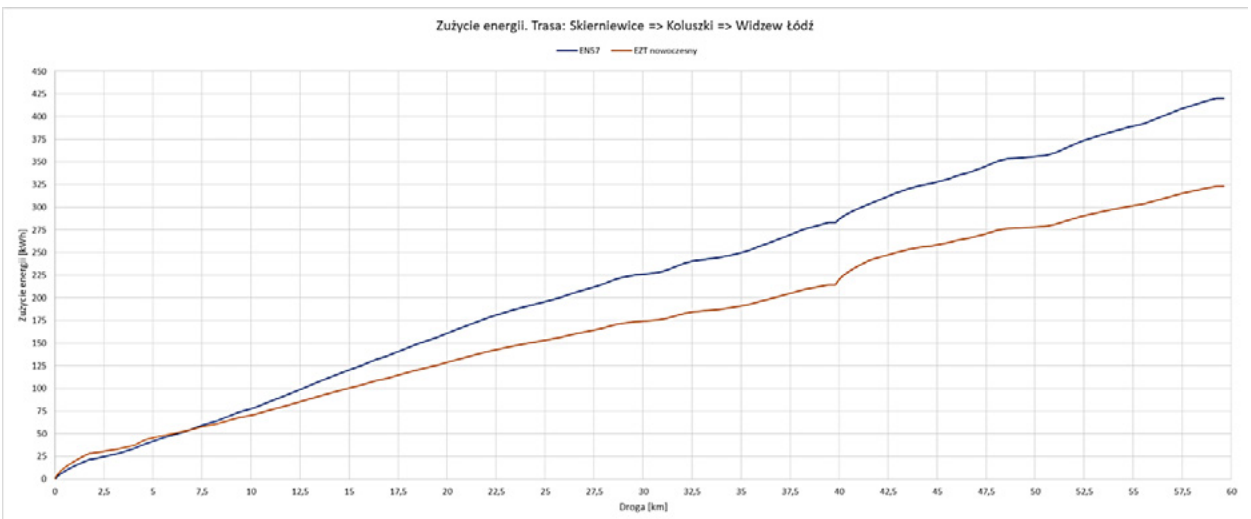
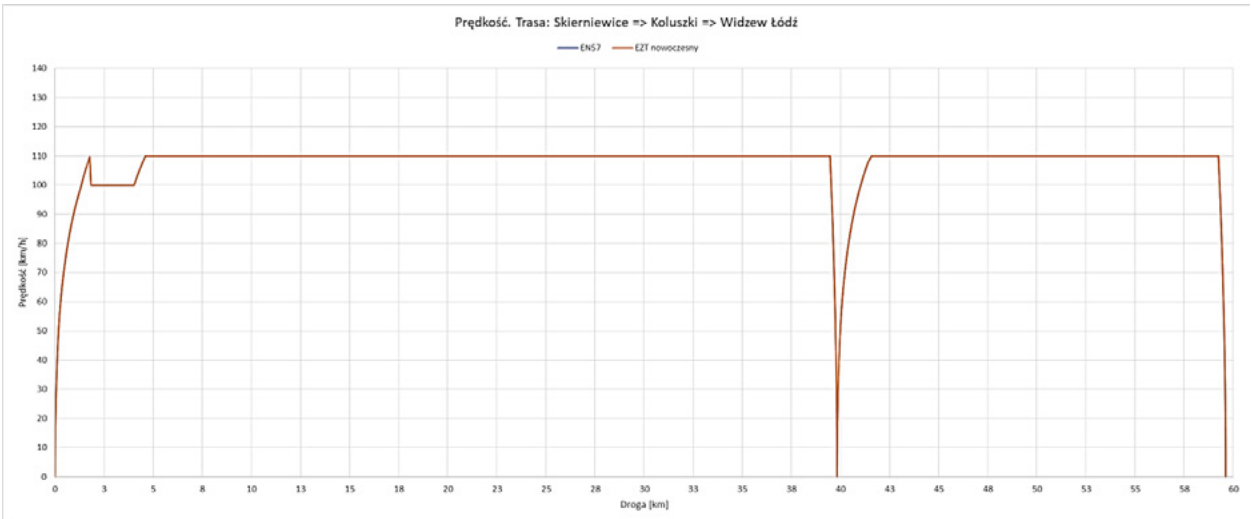
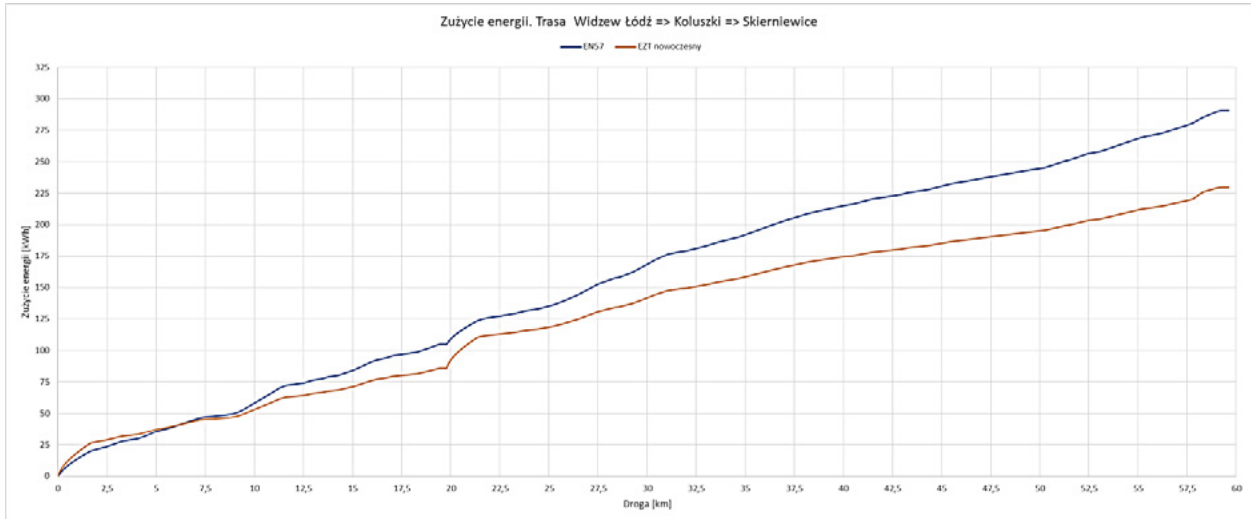


	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
EN57	Trasa REGIONAL	495,8	7,1	70	2974
NOWOCZESNY E2T		509,6	7,3	70	2974

4.5.3. Trasa III – Łódź Widzew – Koluszki – Skierniewice – Koluszki – Łódź Widzew



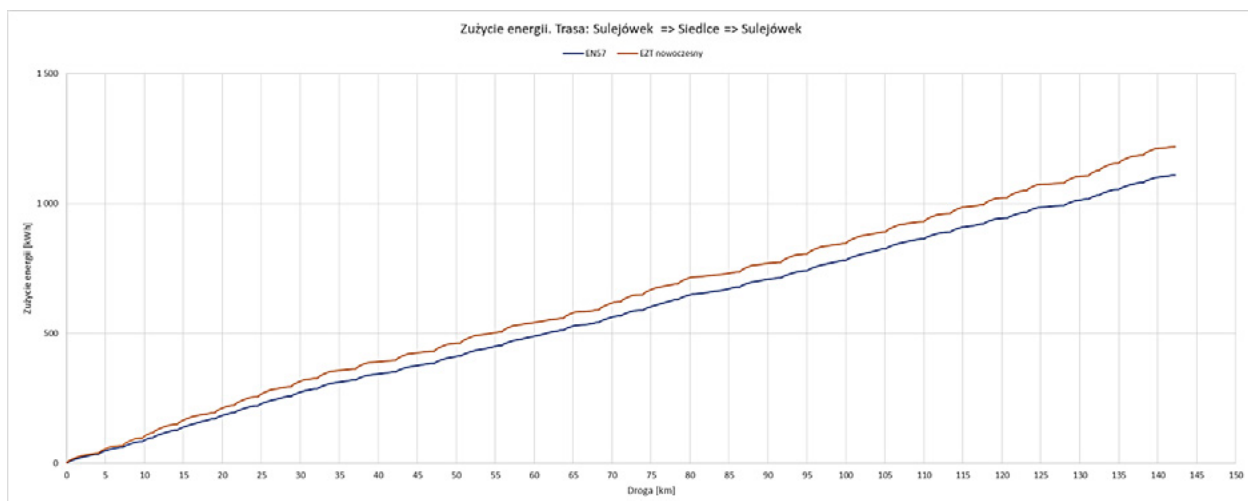
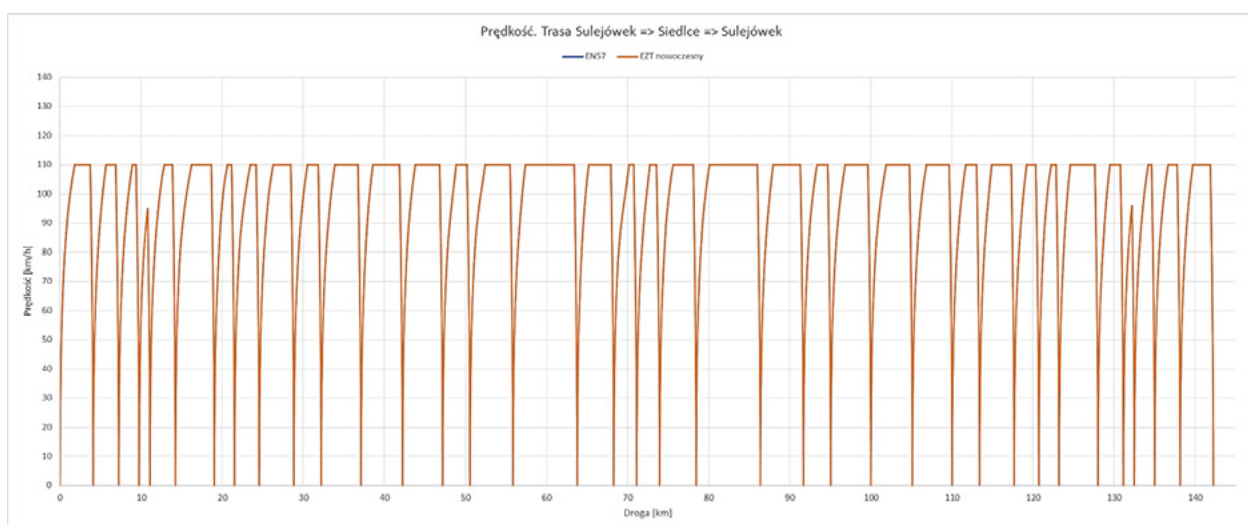
# Porównanie systemów zasilania kolejowej sieci trakcyjnej



	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
EN57	Widzew Łódź => Koluszki => Skierniewice	290,6	4,9	59,622	2046
NOWOCZESNY EZT		229,8	3,9	59,622	2046

	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
EN57	Skierniewice => Koluszki => Widzew Łódź	420,0	7,1	59,622	2051
NOWOCZESNY EZT		323,0	5,4	59,622	2051

#### 4.5.4. Trasa IV – Sulejówek – Siedlce – Sulejówek





	TRASA	ZUŻYTA ENERGIA [kWh]	ŚREDNIE ZUŻYCIE ENERGII [kWh]	DROGA [km]	CZAS PRZEJAZDU [s]
EN57	Sulejówek => Siedlce => Sulejówek	1109,8	7,8	142,24	6253
NOWOCZESNY EZT		1219,0	8,6	142,24	6253

### 4.6. Omówienie wyników

Uzyskane wyniki symulacji przy przyjętych założeniach pokazują zależność zużycia energii od profilu trasy, ograniczeń prędkości oraz zatrzymań. Można zaobserwować wpływ sprawności na zużycie energii w fazie rozruchu pojazdu i w czasie jazdy ze stałą prędkością. Uwidoczniły się także różnice w sprawności obu typów napędów w fazie rozruchu pojazdów, gdzie napęd asynchroniczny może charakteryzować się nieco mniejszą sprawnością, bowiem w tych konkretnych warunkach symulacji nie pracuje on z maksymalnymi parametrami elektromechanicznymi, co może być kompensowane w czasie jazdy na trasie rzeczywistej z większą mocą układu napędowego. Przy analizowaniu zużycia energii szczególną rolę odgrywa sprawność układu napędowego w zakresie mniejszych mocy, stąd w zależności od profilu trasy na jednych trasach napęd asynchroniczny może zużywać mniej energii na cele trakcyjne od klasycznego napędu DC, zaś na innych – odwrotnie. Jest

to technicznie uzasadnione, bowiem po osiągnięciu prędkości maksymalnej silniki trakcyjne prądu stałego są zasilane bezpośrednio z sieci i pracują z wysoką sprawnością energetyczną. W przedstawionych symulacjach widać wpływ sprawności silnika trakcyjnego na zużycie energii. Dla silników trakcyjnych prądu stałego i przemiennego różnice rzędu procenta wpływają za całkowitą wartość zużytej energii na cele trakcyjne. Napęd impulsowy lokomotywy nowoczesnej może uzyskać nieco niższy współczynnik sprawności z uwagi na sprawność falownika i silnika przy obciążeniu mniejszym od znamionowego, gdzie współczynnik mocy ( $\cos \varphi$ ) silników trakcyjnych elektrycznej ma mniejszą wartość. Uzyskane wyniki symulacji wskazują na zbliżone parametry sprawności obu typów napędów w czasie przejazdów bez rekuperacji. Wykorzystanie funkcji zwrotu energii w czasie hamowania do sieci zasilającej pozwala na uzyskanie znaczącego zmniejszenia wartości energii wykorzystanej na cele trakcyjne. W tym aspekcie napęd trakcyjny z silnikami asynchronicznymi ma znaczącą przewagę nad napędem z silnikami prądu stałego.



# Porównanie zużycia i strat energii w systemach 3 kV DC i 2 x 25 kV AC

5

Porównanie zużycia energii oraz jej strat podczas ruchu pociągów zasilanych napięciem 3 kV DC lub w systemie 2 x 25 kV AC przeprowadzono na podstawie wyników symulacji [1] wykonanych z wykorzystaniem programu Sidytrac. Dla obydwu systemów zasilania symulacje przeprowadzono dla linii o tych samych parametrach, tej samej liczbie i rodzajach pociągów jadących z takimi samymi prędkościami maksymalnymi.

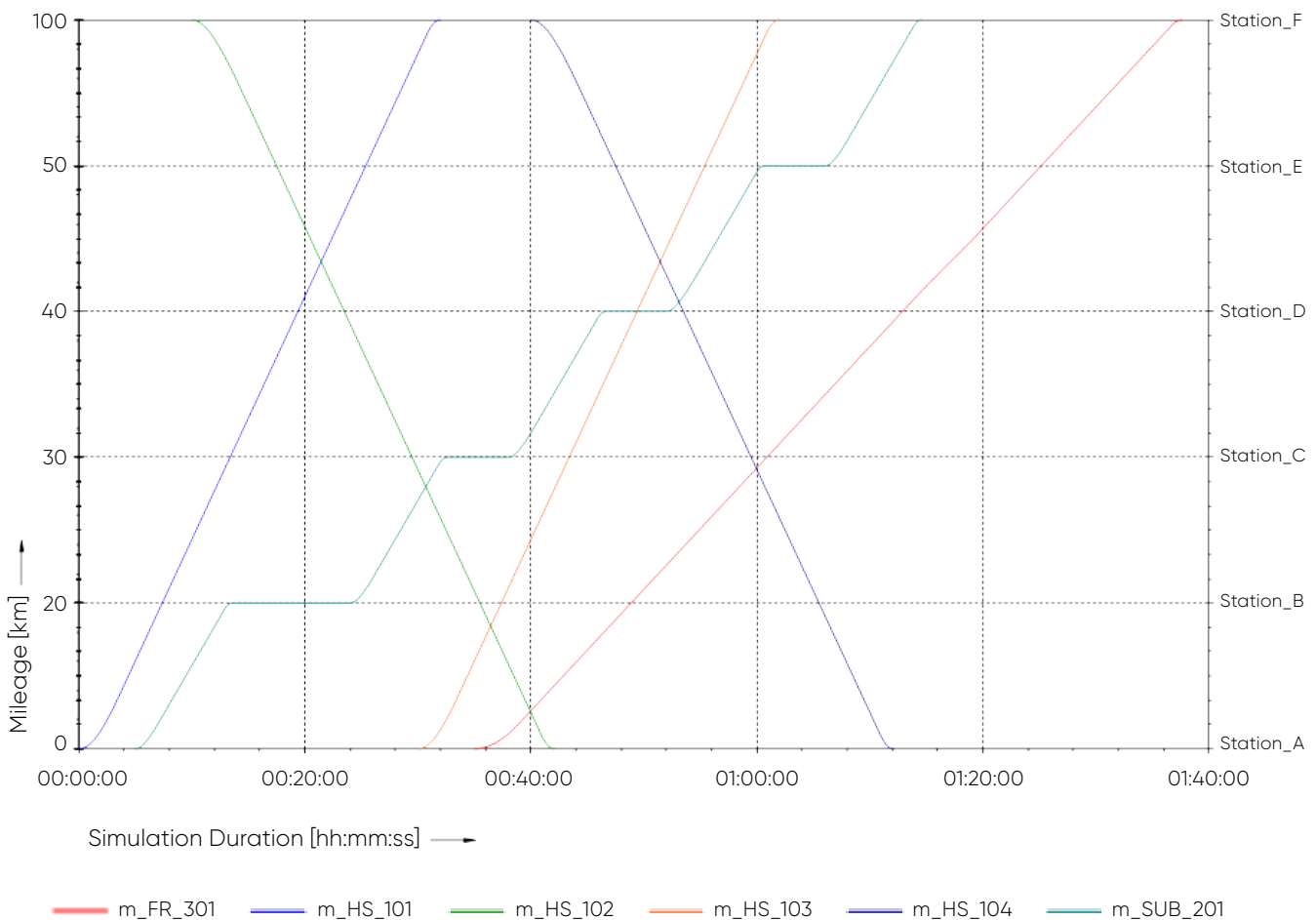
## 5.1. Profil linii i rozkład jazdy

Symulacje wykonano dla hipotetycznej, dwutorowej linii o profilu pionowym pokazanym na rysunku 5.1.

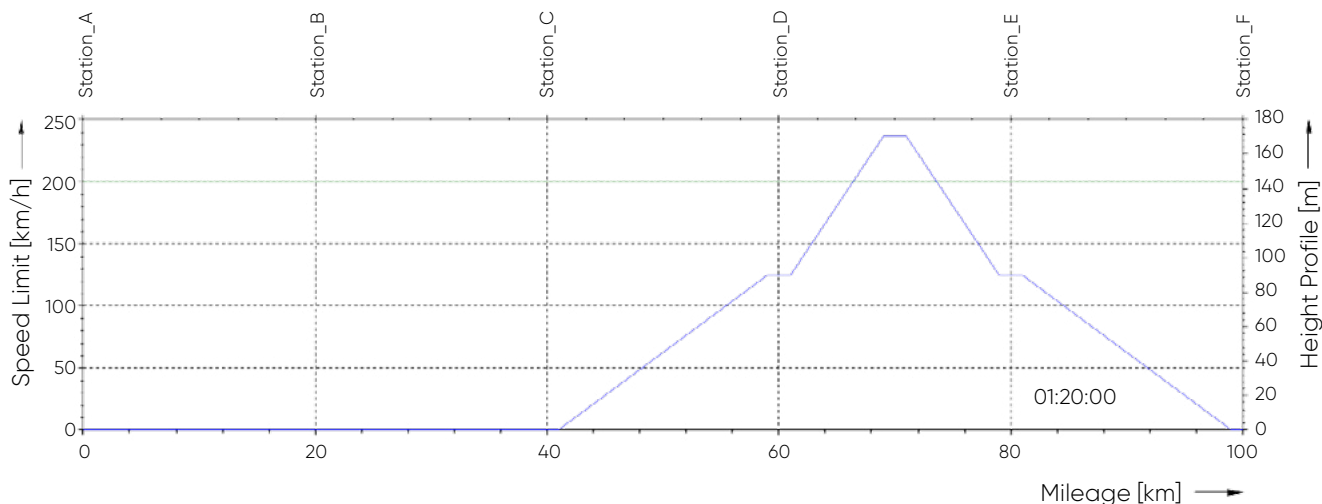
Przyjęty rozkład jazdy przedstawiono na rysunku 5.2. Przejazdy wykonano dla czasu 1 godziny i 40 minut. W tym czasie zasymulowano przejazd 4 pociągów HS z prędkością maksymalną 200 km/h, pociągu towarowego ( $v_{\max} = 100$  km/h) i pociągu regionalnego – ezt ( $v_{\max} = 160$  km/h).

Parametry pociągów przyjęto zgodnie z punktem 6.3 normy EN 50641 [6].

Na symulowanej linii kolejowej jest 6 stacji zlokalizowanych w km 0, 20, 40, 60, 80 i 100. Na stacjach zatrzymuje się tylko pociąg regionalny.



Rys. 5.2. Rozkład jazdy przyjęty do symulacji



Rys. 5.1. Profil pionowy linii i dopuszczalna prędkość

## 5.2. Układ zasilania

### 5.2.1. System 3 kV DC



W symulacjach dla systemu 3 kV DC przyjęto, że linia jest zasilana z 9 podstacji trakcyjnych zlokalizowanych co 12,5 km od km 0 do km 100. Podstacje wyposażone są w dwa zespoły typu PD-17S, zasilane napięciem 15 kV, z transformatorami o mocy 6,3 MVA. Układ zasilania podstacji i parametry jego elementów przedstawiono na rysunku 5.3.

W systemie 3 kV DC sieć jezdna ma sumaryczny przekrój 450 mm<sup>2</sup>.

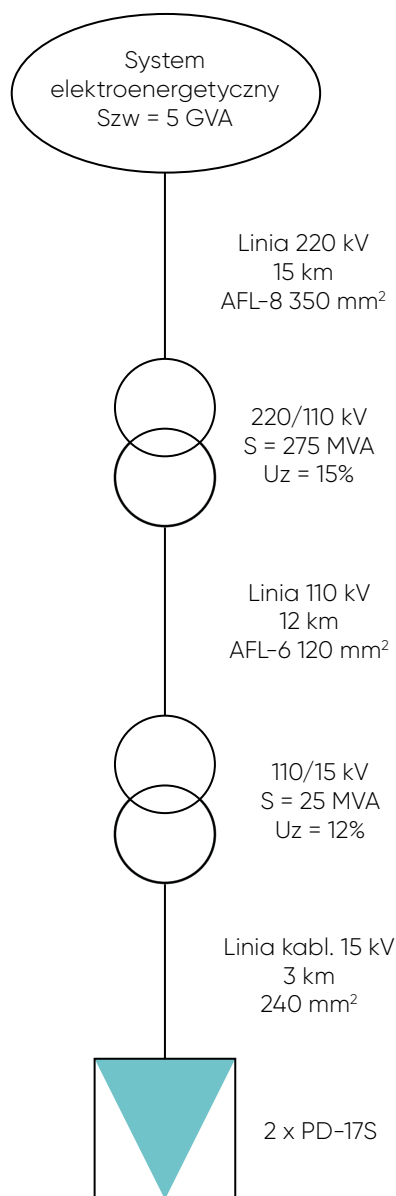
### 5.2.2. System 2 x 25 kV AC



Podstacje trakcyjne w systemie 2 x 25 kV AC zasilane są z systemu elektroenergetycznego (Szw = 5 GVA) liniami 220 kV (AFL-8, 350 mm<sup>2</sup>) o długości 30 km. W podstacjach są dwa transformatory o mocy 25 MVA i  $U_z = 10\%$ . Autotransformatory w kabinach sekcyjnych mają moc 10 MVA i  $U_z = 1\%$ . Lokalizację podstacji i kabin sekcyjnych podano w tabeli 4.

W systemie 2 x 25 kV AC sieć trakcyjna ma przekrój:

- przewód jezdny – 120 mm<sup>2</sup> Cu;
- lina nośna – 70 mm<sup>2</sup> BzII;
- zasilacz dodatkowy – 288 mm<sup>2</sup> Al.



Rys. 5.3. Uproszczony schemat zasilania podstacji w systemie 3 kV DC

PODSTACJA/KABINA	LOKALIZACJA	ZAINSTALOWANA MOC
AT01	km 0,0	10 MVA
AT02	km 12,5	10 MVA
PT1	km 25,0	2 x 25 MVA
AT03	km 37,5	10 MVA
AT SP (kabina środkowa z separacją faz)	km 50,0	2 x 10 MVA
AT04	km 62,5	10 MVA
PT2	km 75,0	2 x 25 MVA
AT05	km 87,5	10 MVA
AT06	km 100,0	10 MVA

**Tabela 4. Lokalizacja podstacji i kabin sekcyjnych w systemie 2 x 25 kV AC**

### 5.3. Wyniki obliczeń zużycia energii i strat

#### 5.3.1. System 3 kV DC



Na podstawie symulacji określono, że przy zakładanym rozkładzie jazdy w czasie 1 godziny i 40 minut (6000 s) całkowite zużycie energii przy zastosowaniu systemu zasilania trakcji 3 kV DC, określone na poziomie 220 kV wniósłoby 16 162 kWh.

Na podstawie wyników symulacji wyznaczono straty energii powstałe podczas przejazdów pociągów w symulowanym czasie. Straty te wyznaczono dla wszystkich 9 podstacji trakcyjnych i sieci trakcyjnej, dla każdego elementu systemu zasilania przedstawionego na rysunku 5.3. Straty te wyniosły:

- system elektroenergetyczny i linia 220 kV – 1,06 kWh,
- transformator 220/110 kV – 0,72 kWh,
- linia 110 kV – 5,43 kWh,
- transformator 110/15 kV – 203,30 kWh,
- linia 15 kV – 27,16 kWh,
- podstacje trakcyjne – 415,40 kWh,
- sieć trakcyjna – 812,00 kWh.

Udział strat poszczególnych elementów systemu w stratach sumarycznych jest następujący:

- system elektroenergetyczny i linia 220 kV – 0,07 %,
- transformator 220/110 kV – 0,05 %,
- linia 110 kV – 0,37 %,
- transformator 110/15 kV – 13,88 %,
- linia 15 kV – 1,85 %,
- podstacje trakcyjne – 28,35 %,
- sieć trakcyjna – 55,42 %.

Suma strat energii w systemie zasilania 3 kV DC symulowanej linii wyniosła 1465 kWh w czasie 6000 s. Stanowi to 9,06% całkowitej energii pobranej z systemu elektroenergetycznego w celu wykonania przejazdów pociągów zgodnie z założonym rozkładem jazdy. Straty energii w systemie zasilania w porównaniu do energii zużywanej przez pociągi (14 697 kWh) stanowią 9,97%.

#### 5.3.2. System 2 x 25 kV AC



Na podstawie symulacji określono, że przy zakładanym rozkładzie jazdy w czasie 1 godziny i 40 minut (6000 s) całkowite zużycie energii przy zastosowaniu systemu zasilania trakcji 2 x 25 kV AC, określone na poziomie 220 kV wniósłoby 15 061 kWh.

Na podstawie wyników symulacji wyznaczono straty energii powstałe podczas przejazdów pociągów w symulowanym czasie. Straty te wyznaczono dla 2 podstacji trakcyjnych i sieci trakcyjnej, dla każdego elementu systemu zasilania przedstawionego na rysunku 5.3. Straty te wyniosły:

- system elektroenergetyczny i linia 220 kV – 7,89 kWh,
- podstacje trakcyjne – 149,50 kWh,
- sieć trakcyjna – 206,00 kWh.

Udział strat poszczególnych elementów systemu w stratach sumarycznych jest następujący:

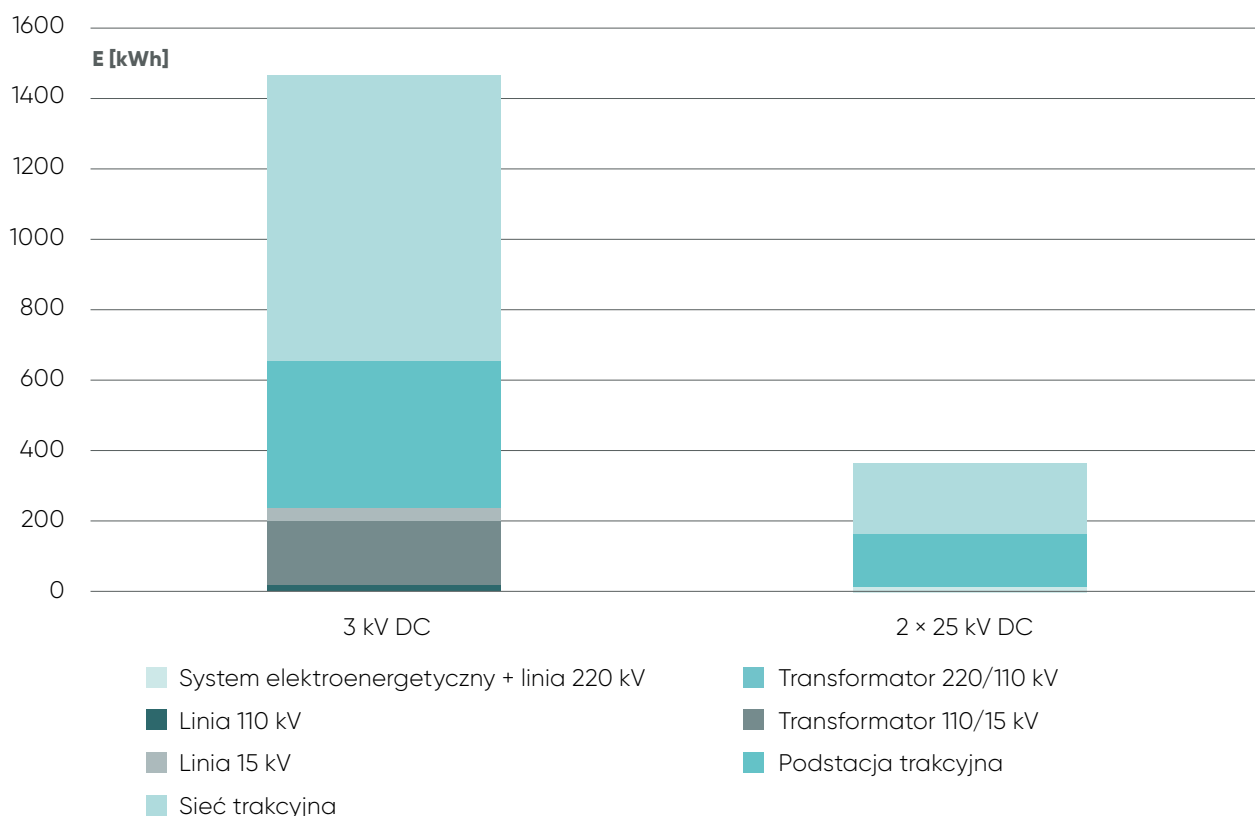
- system elektroenergetyczny i linia 220 kV – 2,17 %,
- podstacje trakcyjne – 41,14 %,
- sieć trakcyjna – 56,69 %.

Suma strat energii w systemie zasilania 2 x 25 kV AC symulowanej linii wyniosła 363,4 kWh w czasie 6000 s. Stanowi to 2,41 % całkowitej energii pobranej z systemu elektroenergetycznego w celu wykonania przejazdów pociągów zgodnie z założonym rozkładem jazdy. Straty energii w systemie zasilania w porównaniu do energii zużywanej przez pociągi (14 698 kWh) stanowią 2,47 %.

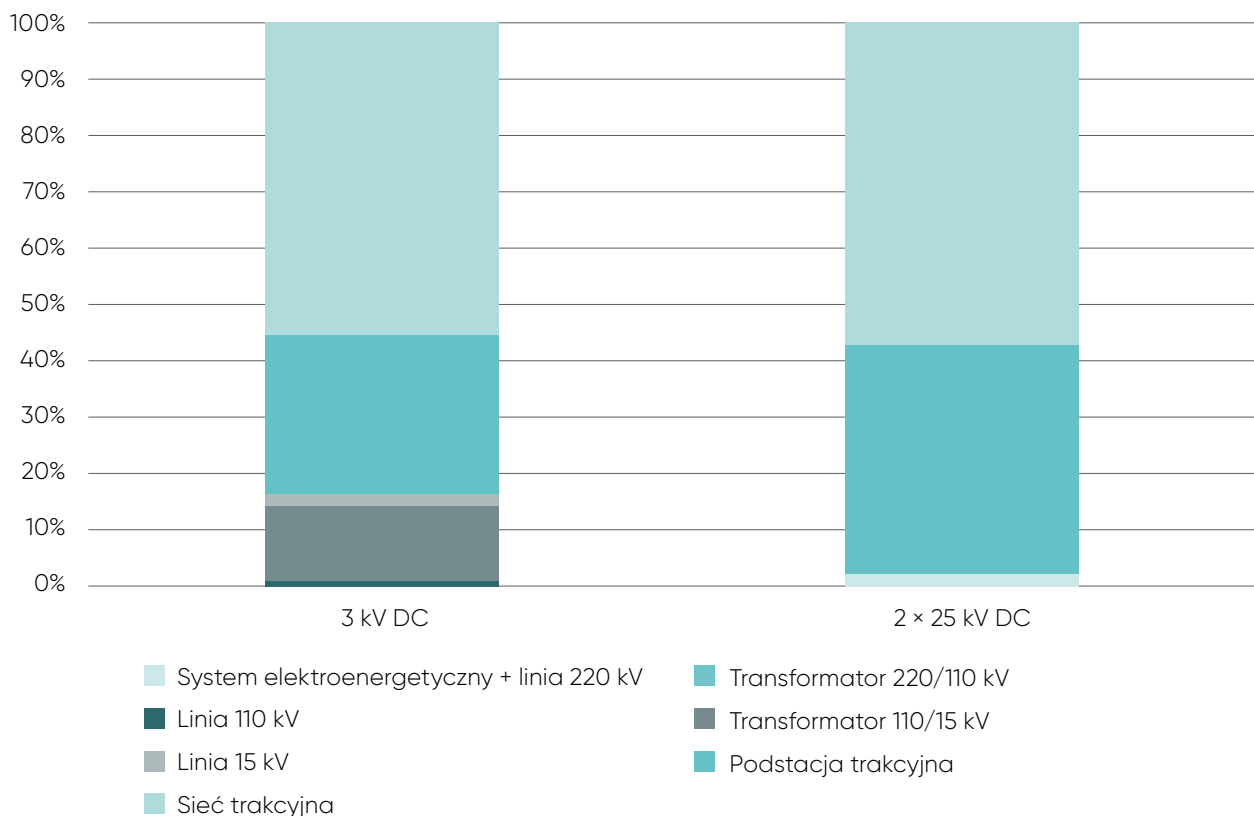
### 5.3.3. Porównanie strat w systemach 3 kV DC i 2 x 25 kV AC

Straty w systemie zasilania 3 kV DC są ponad czterokrotnie większe niż w systemie 2 x 25 kV AC. Porównanie strat przedstawiono na rysunku 5.4. Na rysunku 5.5 przedstawiono udział procentowy strat energii powstających na poszczególnych elementach systemu zasilania w stosunku do strat całkowitych.

Analizując dane przedstawione w punktach 5.3.1 i 5.3.2 oraz rysunki 5.4 i 5.5 można stwierdzić, że straty energii związane z dostarczeniem energii do podstacji trakcyjnych w systemie 3 kV DC są głównie generowane przez transformatory obniżające napięcie z poziomu 220 kV do 110 kV, a następnie do 15 kV. W systemie 2 x 25 kV AC obniżanie napięcia nie jest konieczne, dlatego straty po stronie pierwotnej transformatorów w podstacjach są związane tylko z przesyłami energii, niejednokrotnie na duże odległości. Skutkiem tego jest występowanie w układzie zasilania podstacji trakcyjnych około trzydziestokrotnie większych strat w systemie 3 kV DC niż w systemie 2 x 25 kV AC.



Rys. 5.4. Straty energii w systemie zasilania 3 kV DC i 2 x 25 kV AC



**Rys. 5.5. Podział strat energii na elementy w systemie zasilania 3 kV DC i 2 x 25 kV AC**

Pomimo porównywalnych sumarycznych mocy transformatorów zainstalowanych w podstacjach trakcyjnych (113,4 MVA – 3 kV DC, 100 MVA – 2 x 25 kV AC) ze względu na większe prądy występujące w systemie 3 kV DC, straty energii w podstacjach trakcyjnych w systemie DC są ponad dwa i pół razy większe niż w systemie AC.

W systemie 3 kV DC przekrój sieci jezdnej jest około dwa razy większy niż w systemie 2 x 25 kV AC, a stosowane

w systemach prądu przemiennego stopy miedzi mają niższą przewodność od materiałów stosowanych w systemach DC. Dodatkowo w systemach AC na spadki napięcia w sieci trakcyjnej ma wpływ jej indukcyjność. Pomimo tego w systemie 2 x 25 kV AC straty energii są prawie czterokrotnie niższe niż w systemie 3 kV DC. Spowodowane jest to przepływem w systemie AC prądu ponad osiem razy mniejszego niż w systemie DC przy takiej samej wartości mocy pociągów.

# Wnioski

6

W raporcie porównano systemy zasilania trakcji elektrycznej 3 kV DC i 2 x 25 kV AC. W jego ramach opisano układy zasilania sieci trakcyjnej w obydwu systemach, w tym przeprowadzono analizy dotyczące zajętości terenu przez obiekty zasilania, uwarunkowań w zakresie zasilania podstacji trakcyjnych oraz zestawiono podstawowe parametry obydwu systemów zasilania. Analizując systemy zasilania trakcji elektrycznej należy brać pod uwagę nie tylko same podstacje trakcyjne i sieć trakcyjną, lecz również cały układ zasilania podstacji. Pomimo, że w systemie zasilania 2 x 25 kV AC odległość pomiędzy podstacjami trakcyjnymi jest znacznie większa niż w przypadku systemu 3 kV DC, jednakże w systemie AC instalowane są kabiny sekcyjne z autotransformatorem. W konsekwencji w obydwu systemach obiekty zasilania (podstacje trakcyjne i kabiny sekcyjne) są rozmieszczone co 10–15 km. Przez to zajętość terenu przez obiekty zasilania jest podobna. W zależności od zastosowanych rozwiązań teren zajmowany przez obiekty zasilania w przeliczeniu na 1 km linii w systemie 3 kV DC może być mniejszy lub większy w porównaniu z systemem 2 x 25 kV AC.

Materiał zwraca uwagę, że system 2 x 25 kV AC może wprowadzać do systemu elektroenergetycznego asymetrię i inne zakłócenia. Aby wprowadzane zaburzenia nie przekraczały dopuszczalnych poziomów moc zwarciowa w punkcie zasilania podstacji powinna być co najmniej 100 razy większa niż moc pobierana przez podstacje – moc zainstalowanych transformatorów. Determinuje to konieczność zasilania podstacji trakcyjnych napięciem 220 i 400 kV. Zmniejszenie oddziaływania systemu 2 x 25 kV AC na system elektroenergetyczny jest możliwe poprzez użycie w podstacjach transformatorów innych niż jednofazowe. Wiąże się to ze zmniejszeniem napięcia wyjściowego podstacji z 55 kV nawet do 39,9 kV, co negatywnie wpływa na maksymalne możliwe odległości między podstacjami.

Przeprowadzono również analizę rozwiązań sieci trakcyjnych w systemie 3 kV DC i 2 x 25 kV AC na podstawie rozwiązań eksploatowanych w Polsce, Włoszech, Francji

i Hiszpanii. W rezultacie opisano, że przekroje sieci jezdnych w systemie 2 x 25 kV AC mają około dwa razy mniejszy przekrój w porównaniu z systemem 3 kV DC, lecz w systemie tym wymagane jest stosowanie zasilacza dodatkowego i przewodu ochronnego. Powoduje to, że masa lin i przewodów zainstalowana na konstrukcjach wsporczych jest porównywalna dla obydwu systemów.

W ramach analiz porównawczych systemów zasilania przeprowadzono symulację i obliczenia strat energii w systemach począwszy od systemu elektroenergetycznego na poziomie 220 kV a skończywszy na pantografie pojazdu trakcyjnego. Dla obydwu systemów zasilania symulacje przeprowadzono dla linii o tych samych parametrach, tej samej liczbie i rodzajach pociągów jadących z takimi samymi prędkościami maksymalnymi. Wynik analiz wykazał, że straty energii elektrycznej w systemie 2 x 25 kV są około czterokrotnie mniejsze. Wynika to z wyeliminowania z układu zasilania transformatorów obniżających napięcie zasilające podstacje oraz z mniejszych strat w sieci trakcyjnej, co jest wynikiem przepływu ponad ośmiokrotnie mniejszego prądu.

Analizując wpływ systemu zasilania na osiągi pociągów zwrócono uwagę, że system zasilania 2 x 25 kV AC umożliwia jazdę pociągów z większymi prędkościami niż system 3 kV DC, dla którego prędkość maksymalną pociągów określa się na poziomie 250 km/h. Ponadto, mniejsze straty energii w systemie AC i związane z tym spadki napięcia w sieci trakcyjnej powodują, że pociągi zasilane w tym systemie są w mniejszym stopniu narażone na konieczność ograniczania pobieranego prądu (mocy) niż ma to miejsce w systemie 3 kV DC. Przekłada się to na mniejsze prawdopodobieństwo konieczności ograniczania przyspieszenia i maksymalnej prędkości jazdy pociągów dużej mocy (towarowych i pasażerskich międzyregionalnych). W przypadku, gdy system zasilania trakcji zapewnia zasilanie pociągów napięciem znamionowym, wówczas rodzaj systemu zasilania nie ma wpływu na osiągnięte przez pociągi przyspieszenia, prędkości maksymalne (do 250 km/h), a tym samym czasy przejazdów.

Dopełnieniem raportu są wyniki symulacji i obliczeń sprawności (strat energii) w pojazdach trakcyjnych w zależności od rodzaju rozruchu. Symulacje i obliczenia przeprowadzono dla 4 tras – dwóch teoretycznych i dwóch rzeczywistych. Porównywano sprawność ezt i pociągów z lokomotywami o rozruchu rezystorowym i energoelektronicznym. Według analiz Instytutu Kolejnictwa że nie można jednoznacznie określić, który rodzaj pojazdów trakcyjnych ma lepszą sprawność – z rozruchem rezystorowym czy energoelektronicznym. Jest to zależne od rodzaju trasy oraz liczby zatrzymań. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że w przypadku lokomotyw sprawności są porównywalne, a w przypadku ezt nowoczesne pojazdy z rozruchem energoelektronicznym i silnikami prądu przemiennego mają lepszą sprawność.

Zebrane w raporcie analizy wskazują, że nie można jednoznacznie ocenić, który z analizowanych systemów zasilania sieci trakcyjnej jest lepszy do zastosowania

w warunkach polskich – szczególnie przy prędkościach jazdy do 200 – 250 km/h. Przy ewentualnych rozstrzygnięciach trzeba mieć świadomość, że budowa systemu 2 x 25 kV AC wymaga dodatkowego nakładu prac w zakresie systemu elektroenergetycznego wysokich napięć, prac związanych z oddziaływaniem między systemami 25 kV AC oraz pozostałymi systemami zasilania transportu i podmiotami trzecimi. Dodatkowo wymaga utworzenia procesów i nowych procedur dla zarządców infrastruktury. Ważne są również problemy związane ze standardami srk, indukowanie napięć w obwodach torowych, interakcje z sąsiadującą infrastrukturą, itd. Należy zwrócić uwagę, że w Polsce jest prawie 12 tys. km zelektryfikowanych linii kolejowych w systemie 3 kV DC, zasilanych z ponad 500 podstacji trakcyjnych, w znakomitej większości przypadków nowych lub zmodernizowanych w ostatnich latach. Z tego względu wprowadzenie systemu 2 x 25 kV AC jest obecnie racjonalne na nowych, wydzielonych liniach lub liniach nieelektryfikowanych o długości ponad 100 km.





### LITERATURA

- [1] Comparison simulation of 3 kV DC and 2x25 kV 50 Hz for Instytut Kolejnictwa. Report SMO RI EL COC SE/1019,01/STS. 09.2020.
- [2] Dolmel Drives Ltd. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa silnika Lk-470.
- [3] Domański E., Kowalczyk E., Skoniecki J.: Elektryczne zespoły trakcyjne serii EW55 i EN57 Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1974.
- [4] EN 50388:2012. Zastosowania kolejowe -- System zasilania i tabor -- Warunki techniczne koordynacji pomiędzy systemem zasilania (podstacja) i taborem w celu osiągnięcia interoperacyjności
- [5] EN 50591:2019. Railway Applications - Rolling Stock - Specification and verification of energy consumption.
- [6] EN 50641:2020. Railway applications - Fixed installations - Requirements for the validation of simulation tools used for the design of electric traction power supply systems.
- [7] Guido Gidi Buffarini Prezentacja firmy ITALFERR 2007 r.
- [8] let-107. Wytyczne projektowania i warunki odbioru sieci trakcyjnej z uwzględnieniem standardów i wymogów dla linii interoperacyjnych, PKP PLK S.A. Warszawa, kwiecień 2014 r.
- [9] Kacprzak J.: Teoria trakcji elektrycznej. Materiały do projektowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1996.
- [10] Kaniewski M., Maciołek T.: Sieci trakcyjne dużych prędkości jazdy na PKP, MET 2003.
- [11] Katalog sieci trakcyjnej. Podwieszenia rurowe. Sieć trakcyjna YC150-2CS150 z odmianą YC120-2CS150, Warszawa 2010.
- [12] Koleje Mazowieckie. MWZ3-26-06-2017. SIWZ "Zakup elektrycznych pojazdów trakcyjnych", 2017.
- [13] Łódzka Kolej Aglomeracyjna. SIWZ "Zakup 14 elektrycznych pojazdów trakcyjnych", 2016.
- [14] Mazurek S., Kurpanik B.: Podstawy obsługi lokomotywy elektrycznej serii et22, 2006. [http://zzmgliwice.pl/Ffiles/et22obsługa\\_czesc\\_1.pdf](http://zzmgliwice.pl/Ffiles/et22obsługa_czesc_1.pdf)
- [15] Piątek S., Węclewski S., Żałopa J.: Lokomotywy Elektryczne Serii ET22. WKiŁ, Warszawa 1991.
- [16] Rojek A., Kaniewski M.: Koleje dużych prędkości w Polsce. Monografia pod redakcją naukową Mirosława Siergiejczyka. Rozdział 8.
- [17] Rojek A.: Tabor, zasilanie trakcji elektrycznej i elektroenergetyka kolejowa. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2010.
- [18] Rojek A.: Wybrane problemy z zastosowaniem w Polsce systemu zasilania trakcji elektrycznej 2 x 25 kV 50 Hz. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 155, Warszawa 2012, s. 60 – 71 + wkłdaka.
- [19] Rostkowski W.: Przegląd konstrukcji sieci trakcyjnych w krajach Unii Europejskiej, TTS 4/2006.
- [20] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1301/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Energia” systemu kolei w Unii. Dz.U. UE L 356/179 z 12.12.2014.
- [21] Siemiński T.: Zasilanie trakcji elektrycznej nowej linii kolejowej Paryż – Lion. Trakcja i Wagony 7/1982.
- [22] Technical Memorandum – Traction Power 2x25 kV Autotransformer Feed Type Electrification System & System Voltages TM 3.1.1.1. Parsons Brinckerhoff, 2010

fundacja  
**ProKolej** 

**Fundacja „ProKolej”**  
**ul. Wspólna 47/49,**  
**00-684 Warszawa**  
**tel.: +48 22 243 81 37**

**[www.prokolej.org](http://www.prokolej.org)**