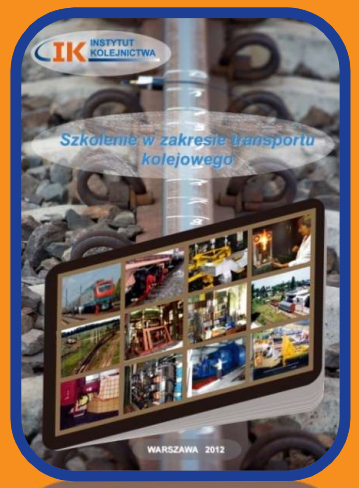


Seminarium naukowe Instytutu Kolejnictwa



Możliwości przejazdu pojazdów kolejowych z poborem prądu przez odcinki obecnie osygnalizowane wskaźnikami „jazdy bezprądowej”

dr inż. Artur Rojek
prof. dr hab. Inż. Valeriy Kuznetsov

IK INSTYTUT KOLEJNICTWA

Warszawa, 17.11. 2026 r.

1. Wprowadzenie w problem

Strefa jazdy bezprądowej



We8a – początek jazdy bezprądowej, 30–80 m przed elementem sekcjonowania

We9a/b/c – koniec strefy, odległość zależna od długości pociągu

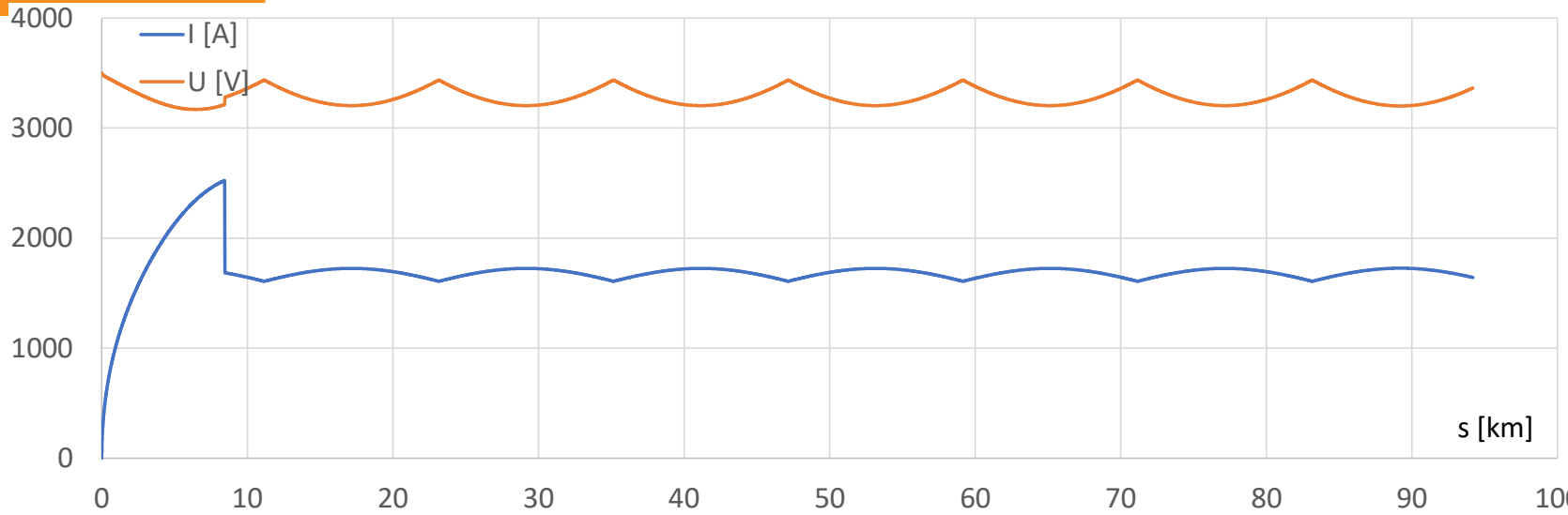
We8a/b/c – „przejazd bez poboru prądu”

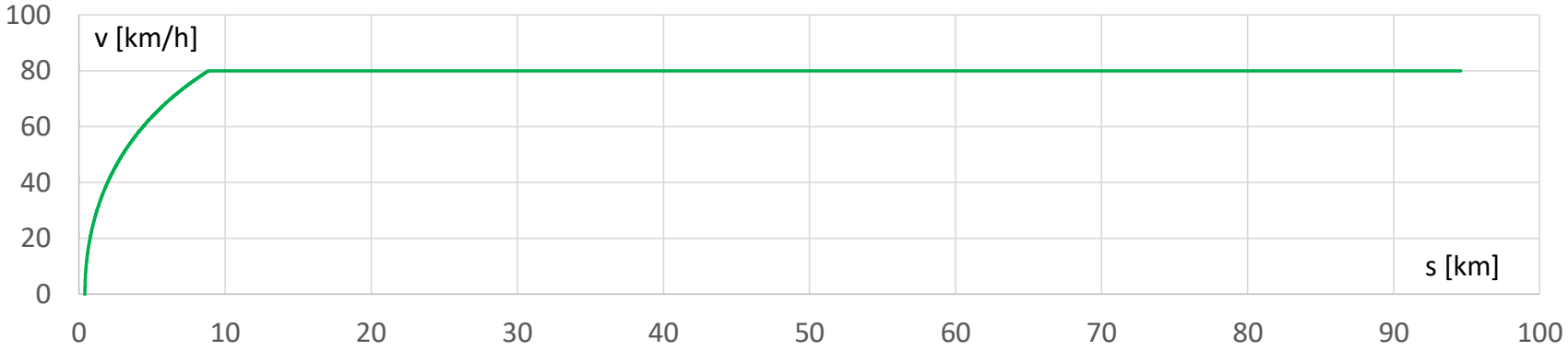
Umieszczany w odległości 30–80 m przed punktem rozdziału sieci (przerwa izolacyjna, izolator sekcyjny, przerwa powietrzna). Pociąg przejeżdża przez ten odcinek bez pobierania prądu trakcyjnego. Oznaczenia b/c odnoszą się do torów odgałęziających się odpowiednio w prawo lub w lewo.

We9a/b/c – „możliwość poboru prądu”

W tym miejscu można wznowić pobór prądu. Odległość za punktem rozdziału sieci zależy od usytuowania odbieraka prądu: We9b (lokomotywy) 30 – 100 m, We9a (zespoły trakcyjne) 200 – 250 m, We9c (zespoły trakcyjne o długości powyżej 200 m) 400 – 450 m.

Wpływ na ruch kolejowy
Bez stref jazdy bezprądowej





Pociąg:

m = 2500 t

lokomotywa: Traxx

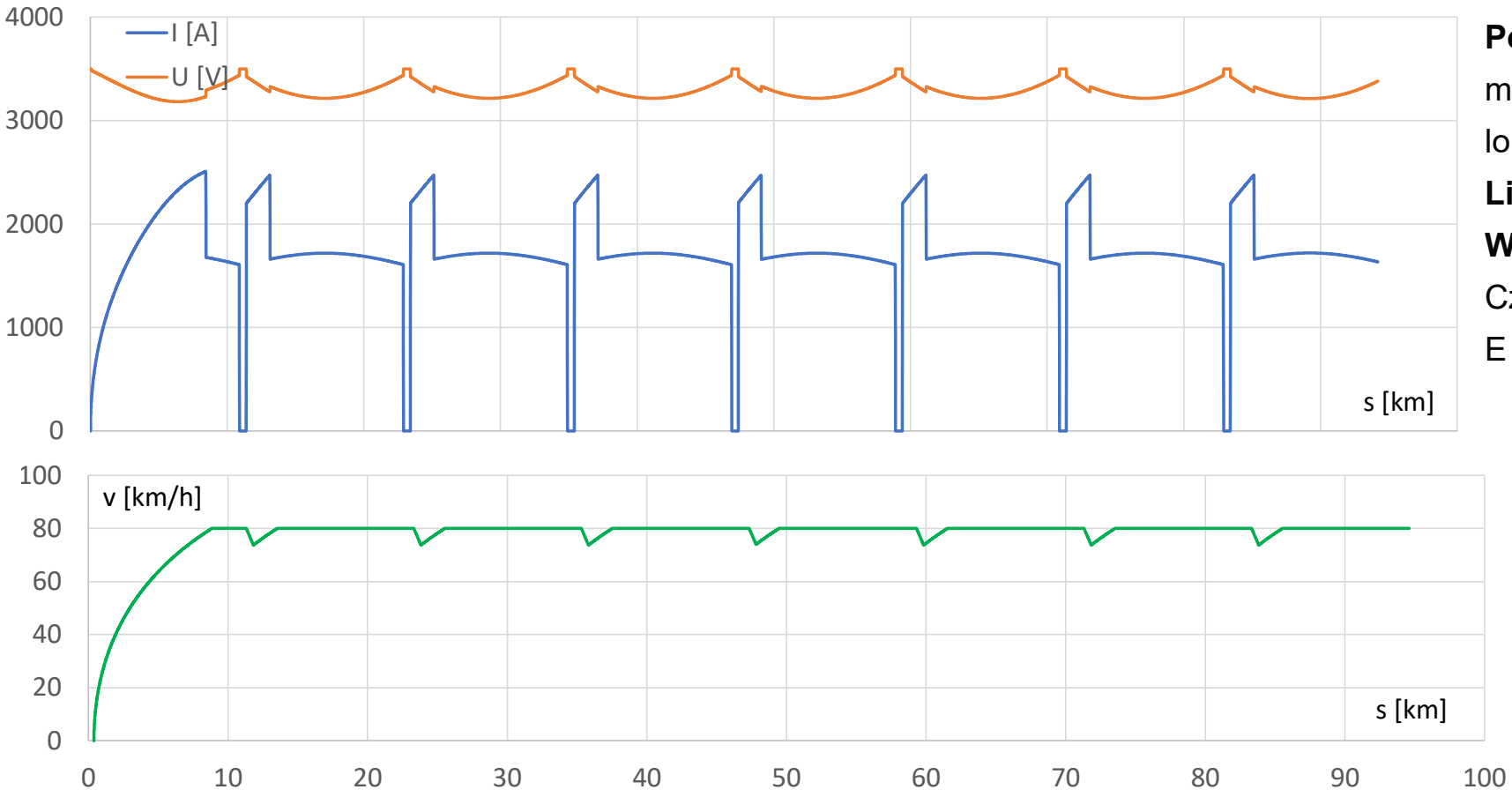
Linia: prosta o pochyleniu 0,5 %

Wyniki:

Czas jazdy: 1:15:28

E = 6812,1 kWh

Wpływ na ruch kolejowy
Ze strefami jazdy bezprądowej



Pociąg:

m = 2500 t

lokomotywa: Traxx

Linia: prosta o pochyleniu 0,5 %

Wyniki:

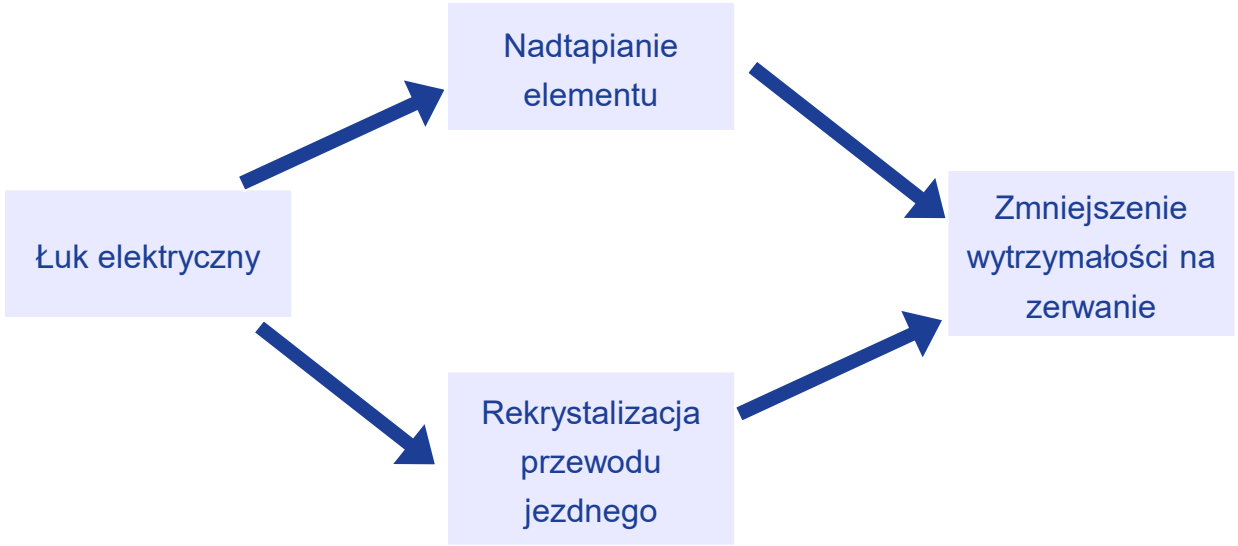
Czas jazdy: 1:15:56 (+28 s)

E = 6959,9 kWh (+147,8 kWh)

Strefa jazdy bezprądowej – po co?

Odpowiedź:

Uniknięcie zapłonu łuku na elemencie izolacji wzdłużnej w wyniku różnicy potencjałów na sąsiednich sekcja zasilania



1. Wprowadzenie w problem

Etap I – teoria

- Model ΔU na przęsłach zbocznikowanych (PT, KS)
- Kryterium E ≤ E_dop → I_dop(V, ΔU)
- Kryteria projektowe R_max, R_sum
- Przykłady: przęsło izolowane, izolator sekcyjny

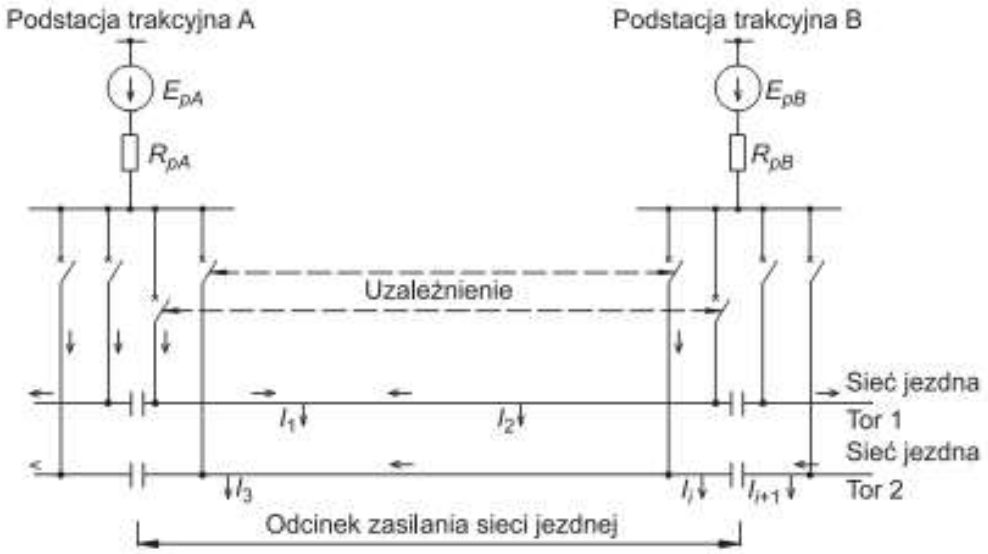
Etap II – weryfikacja

- Tor doświadczalny Żmigród: 16 przejazdów, 500–2000 A
- Linia nr 131: 12 przejazdów, 500 - 1500 A
- Rejestracja ΔU

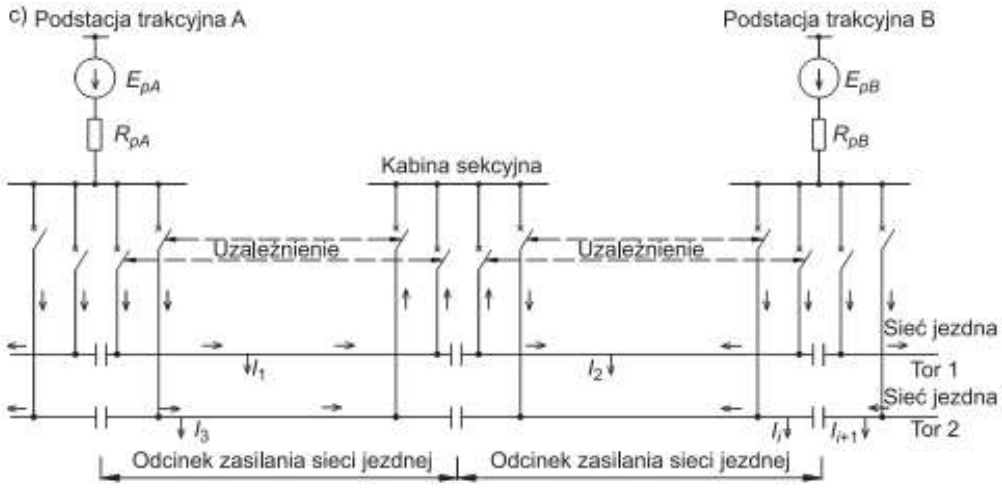
Etap III – wskaźniki

- Wskaźniki We-8, We-9
- Warianty unifikacji
- Spójność z TSI OPE, TSI CCS, PN-EN 16494
- Rekomendacje zmian przepisów R1–R11

Zasilanie sieci 3 kV DC – zasilanie dwustronne



a) zasilanie dwustronne między PT A i PT B

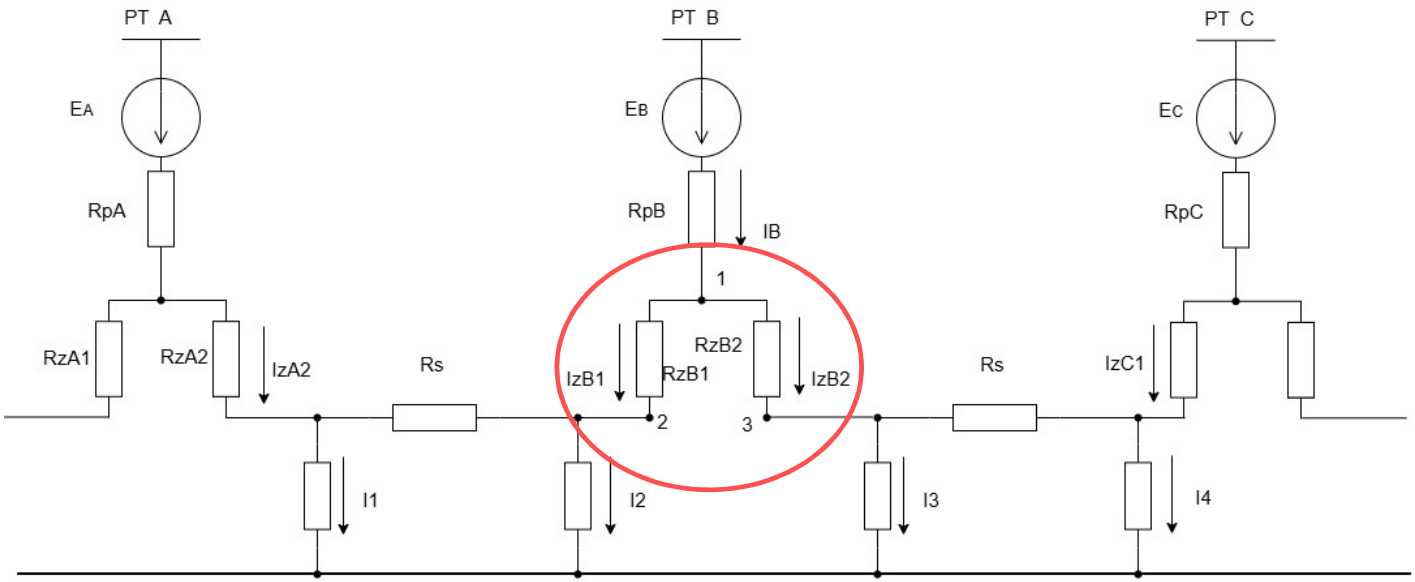


b) zasilanie dwustronne z kabiną sekcyjną

- Obciążenie zmienia się w sposób ciągły (liczba, wartość i położenie pociągów) – analiza metodą schematów chwilowych

Źródło: Szeląg A., Trakcja elektryczna – podstawy, OW PW, 2019

Różnica potencjałów na przęśle izolowanym przy PT



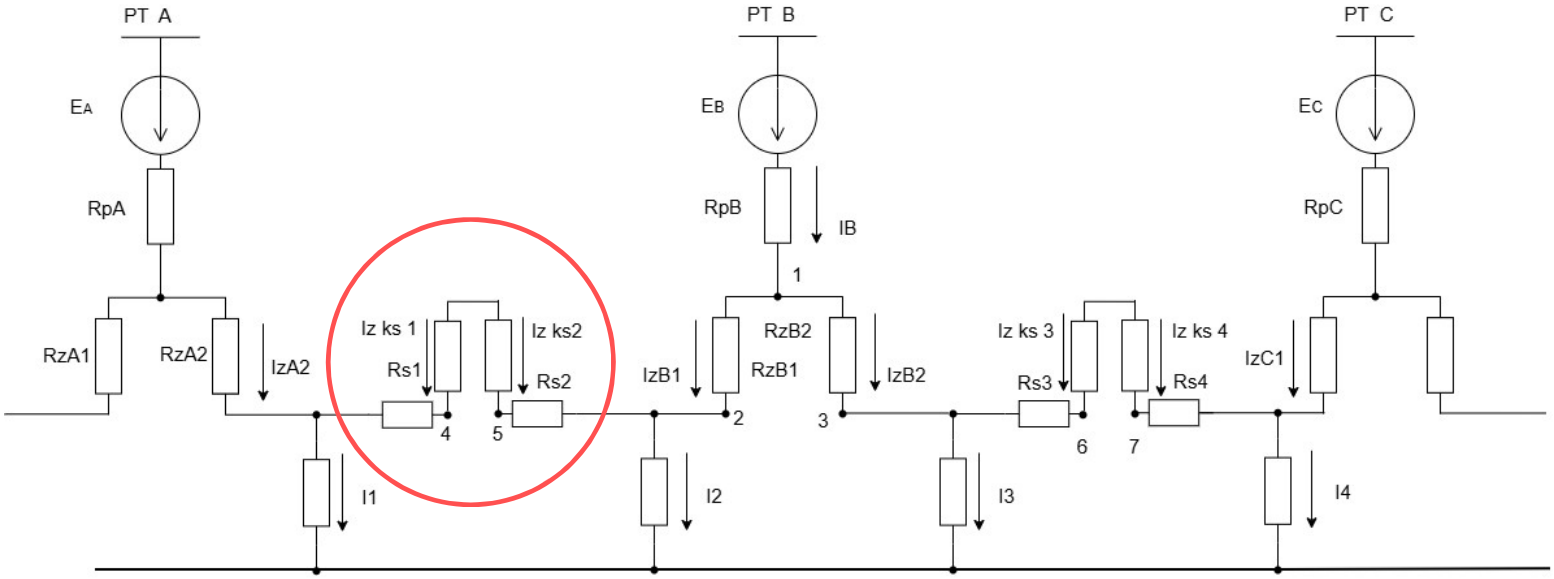
Schemat zastępczy zasilania dwustronnego dla jednego toru [opracowanie własne]

Prądy zasilaczy: $I_ZA = (1/I)\cdot\Sigma\, I_i\cdot I_iB + (U_A - U_B)/(r\cdot I)$

Potencjały: $\varphi_2 = U_B - I_B\cdot R_pB - I_ZB1\cdot R_ZB1$; $\varphi_3 = U_B - I_B\cdot R_pB - I_ZB2\cdot R_ZB2$

$U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3 = I_ZB2\cdot R_ZB2 - I_ZB1\cdot R_ZB1$

Różnica potencjałów na przęśle izolowanym przy KS



Schemat zastępczy zasilania dwustronnego z kabiną sekcyjną, jeden tor linii wielotorowej [opracowanie własne]

Wyłączniki KS zamknięte – przęsło zbocznikowane szynami KS: I_Zks1 = −I_Zks2, I_Zks3 = −I_Zks4

U_{45} = I_Zks1·R_Zks1 − I_Zks2·R_Zks2; U_{67} = I_Zks3·R_Zks3 − I_Zks4·R_Zks4

1. Wprowadzenie w problem

Idea: różnicę potencjałów wywołuje sam pociąg

Na prześle izolowanym zbocznikowanym szynami 3 kV DC obie sekcje mają ten sam potencjał źródła. Jedyną różnicą potencjałów na przerwie jest różnica spadków napięcia w dwóch zasilaczach – wywołana głównie prądem przejeżdżającego pociągu.

Podstacja trakcyjna (najgorszy przypadek)

$$\Delta U = I_{poc} \cdot R_{max}$$

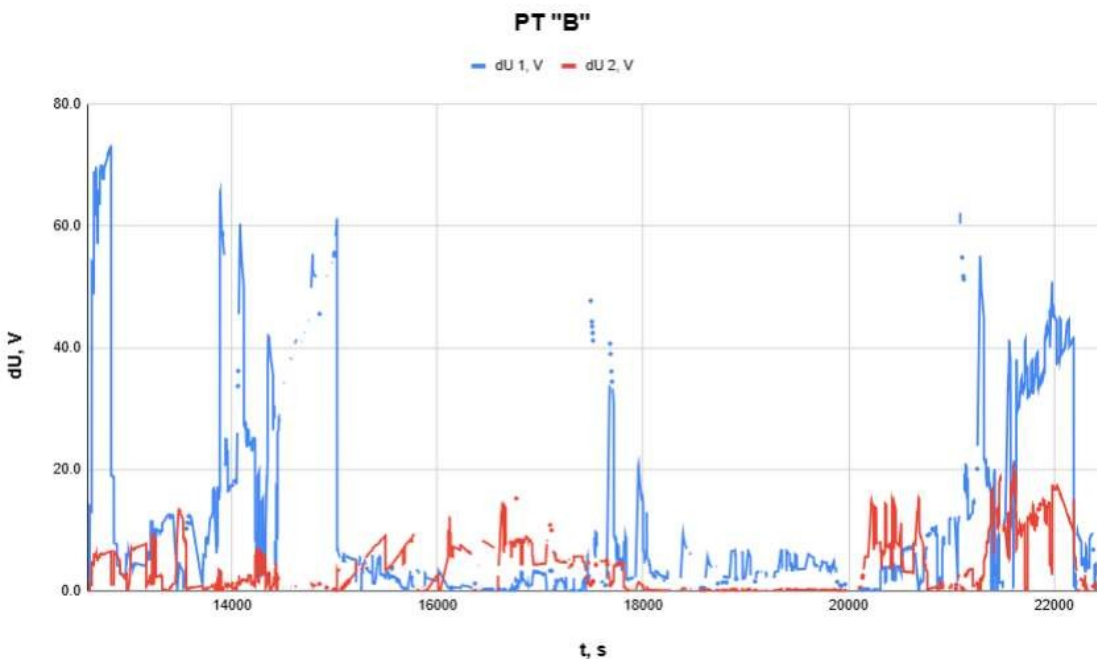
Kabina sekcyjna (najgorszy przypadek)

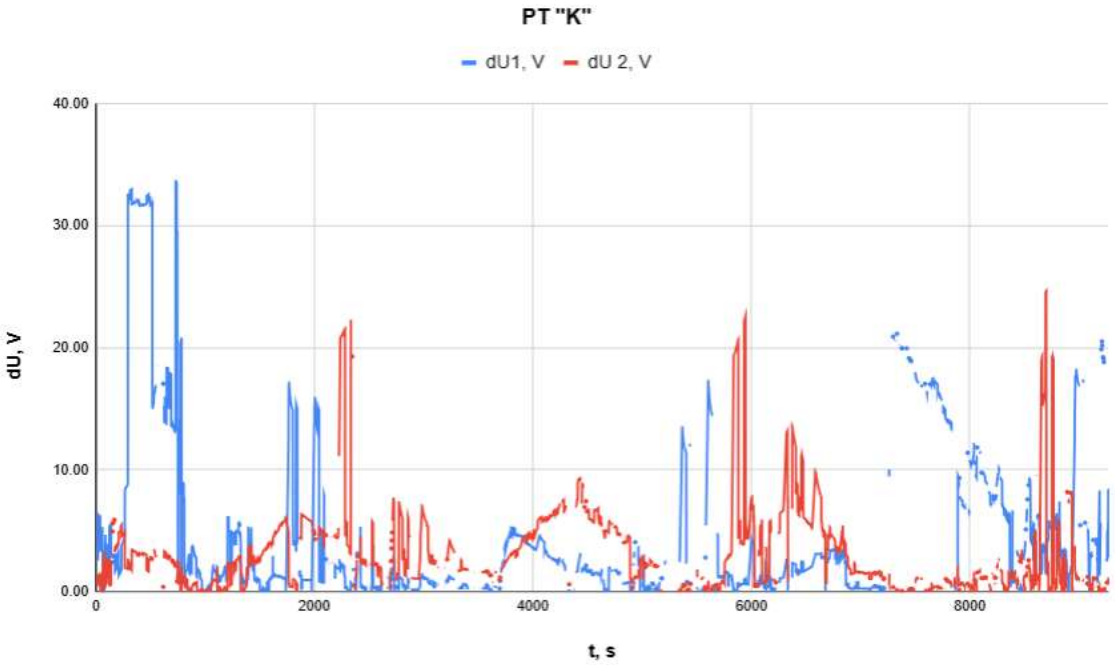
$$\Delta U = (I_{poc} / 2) \cdot R_{sum}$$

- **ΔU wynosi kilkadziesiąt woltów**, a nie setki woltów jak między sekcjami rozdzielonymi galwanicznie
- Dopuszczalność poboru prądu staje się kwestią **rezystancji zasilaczy**, na którą zarządca infrastruktury ma wpływ
- Hipoteza sprawdzona w badaniach Etapu II

2. Teoria – Etap I

Symulacja ΔU dla podstacji (SIDYTRAC)

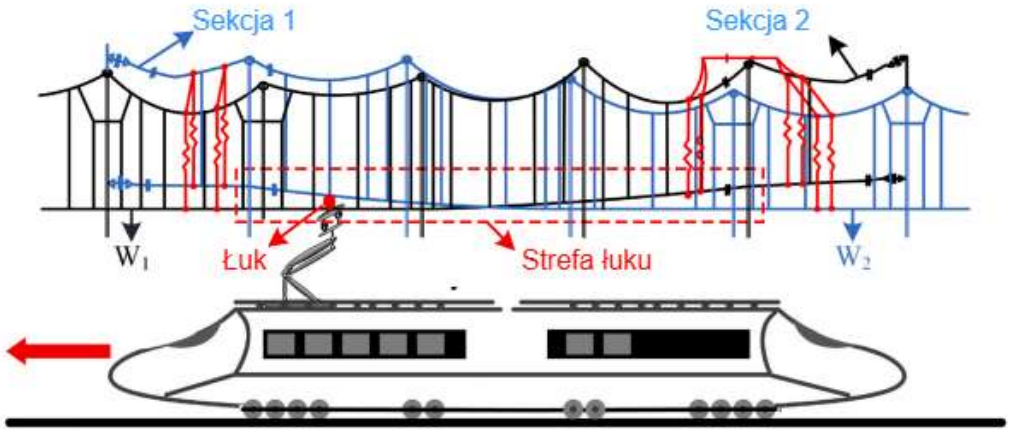




- Zwiększona ΔU wynika z nierównomiernego obciążenia i nierównych rezystancji zasilaczy (długość, przekrój, sieć napowietrzna a kabel)
- Środek zaradczy: obniżenie rezystancji „słabszego” zasilacza, np. dodatkowy kabel równoległy

2. Teoria – Etap I

Łuk przejściowy na przęśle izolowanym



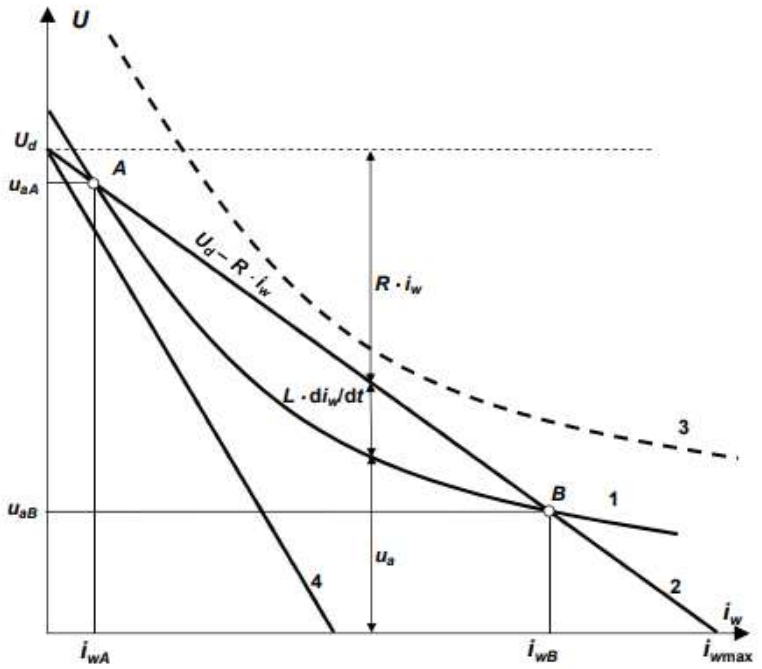
Łuk przejściowy przy opuszczaniu sekcji 1 przez pantograf [Wang X. i in., 2026]

Parametry decydujące o łuku

- **ΔU między sekcjami** – zapłon w przerwie powietrznej
- **Prąd pociągu I** – podtrzymuje łuk, określa energię
- **Prędkość V** – czas trwania łuku, chłodzenie aerodynamiczne
- **Geometria** – zmienna w czasie przerwa nakładka–przewód
- **Środowisko** – wilgotność, ciśnienie, wysokość n.p.m.

2. Teoria – Etap I

Dlaczego łuk przy prądzie stałym jest krytyczny



1, 3 – charakterystyki statyczne łuku; 2, 4 – charakterystyki obwodu [Rojek A., 2016]

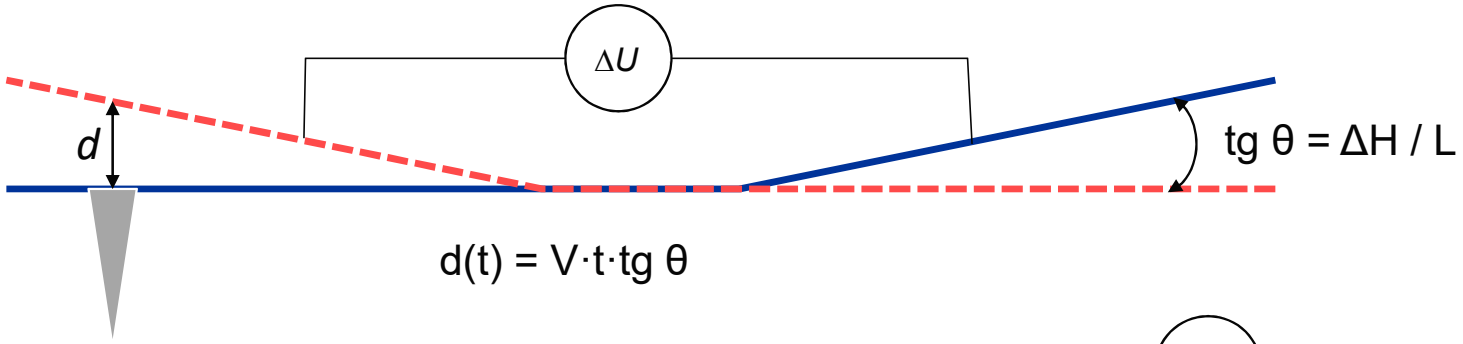
- Cassie (1939) – model stacjonarny łuku; Mayr (1943) – dynamiczny model bilansu energii
- Przy AC łuk gaśnie w zerze prądu; **przy DC naturalnego przejścia przez zero nie ma**
- Punkt B – równowaga stabilna: łuk pali się trwale; punkt A – niestabilny
- Przerwanie wymaga, aby charakterystyka łuku leżała powyżej charakterystyki obwodu dla każdego prądu
- Większa ΔU → dłuższy i gorętszy łuk; większa prędkość i mniejsza ΔU sprzyjają zgaszeniu

Kiedy zapali się łuk?

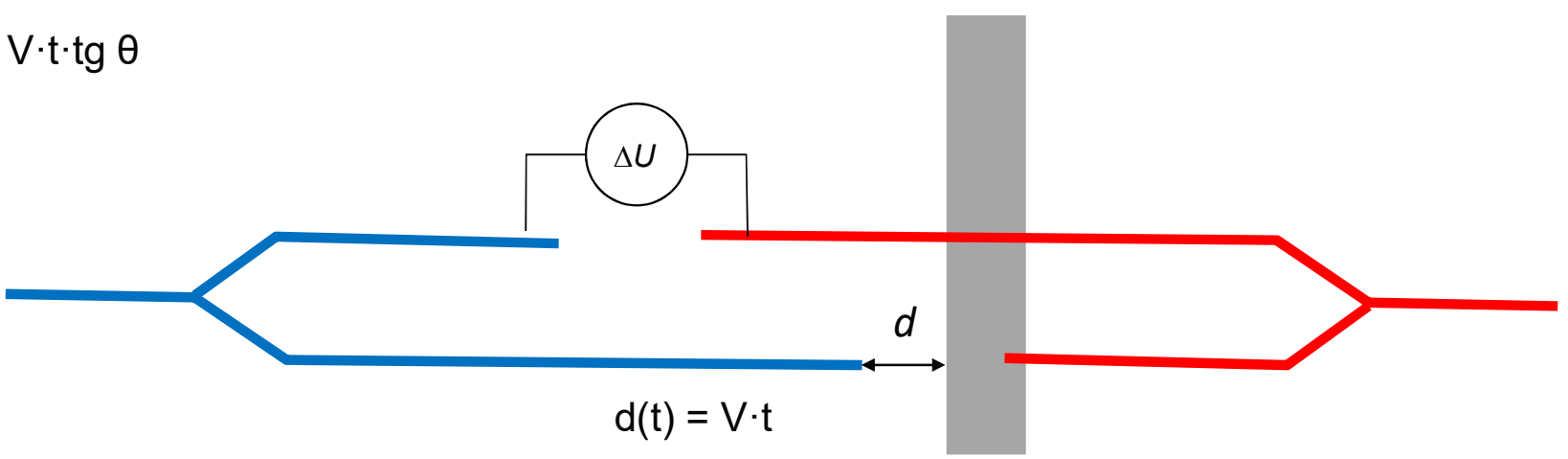
Łuk elektryczny zapala się, gdy różnica potencjałów ΔU przekracza napięcie przebicia izolacji powietrznej o odległości d:

$$\Delta U = 25{,}4d + 6{,}64\sqrt{d}$$

$$E = \Delta U \cdot I \cdot t \leq 80\ J$$



$$d(t) = V \cdot t \cdot \operatorname{tg}\theta$$

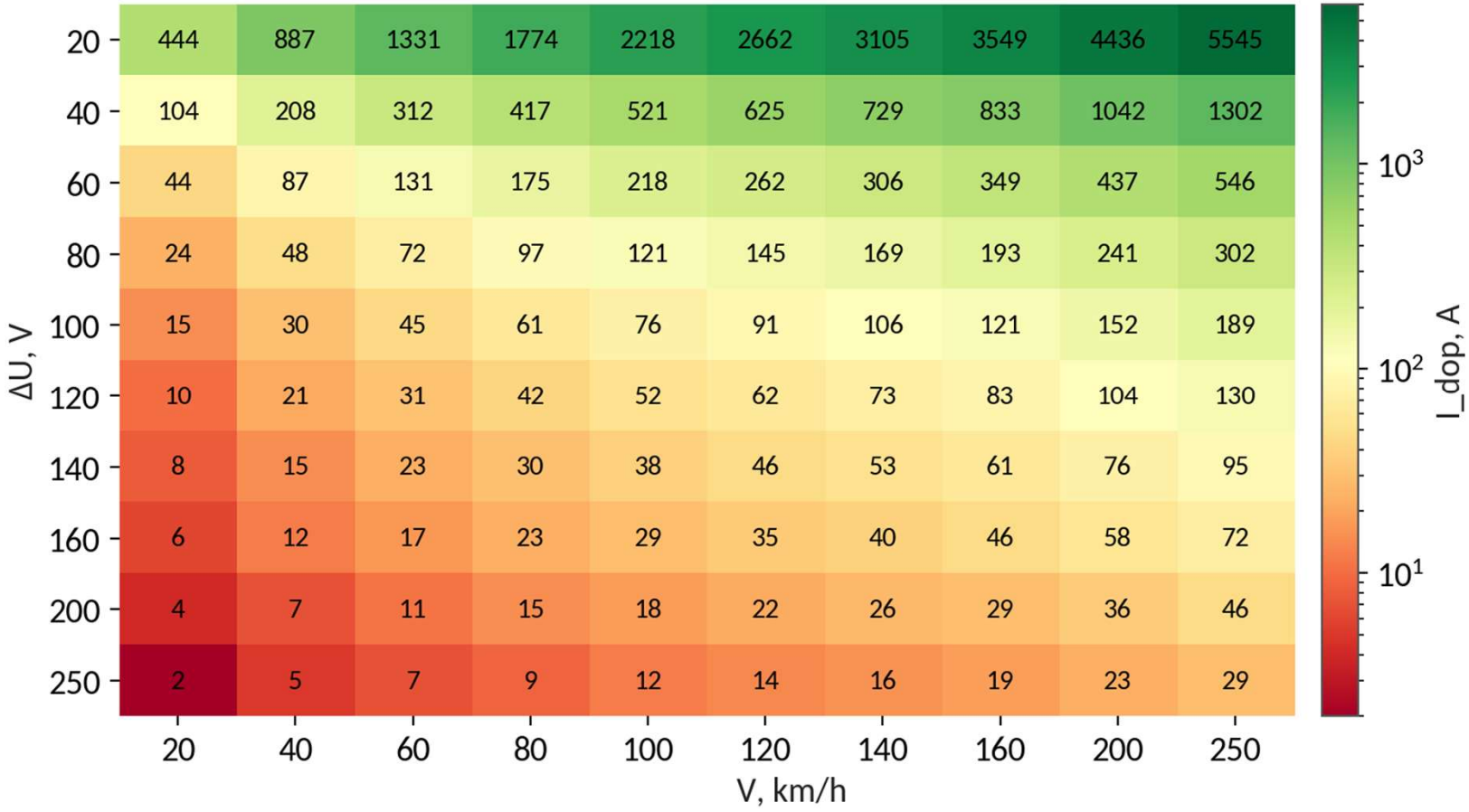


$$d(t) = V \cdot t$$

Prąd dopuszczalny dla przęsła izolowanego

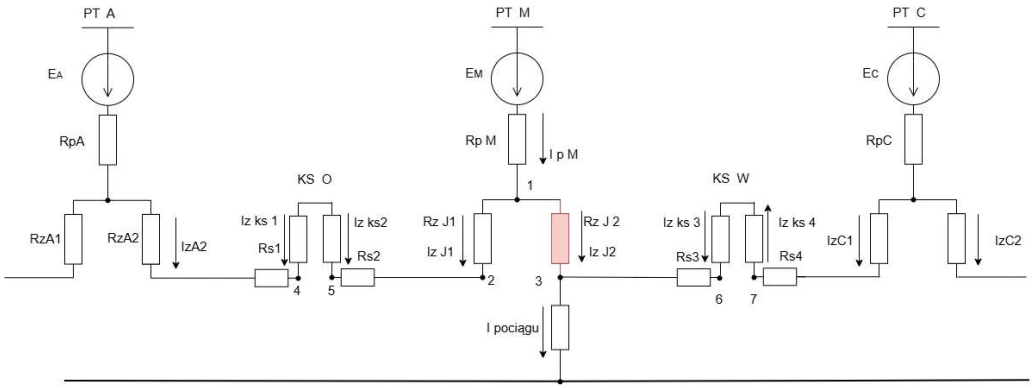
$$I_{dop} = \frac{E_{dop}}{\Delta U \cdot t_{th}}$$

$$I_{dop} = 11638 \cdot \frac{V}{\Delta U^{2.097}}$$

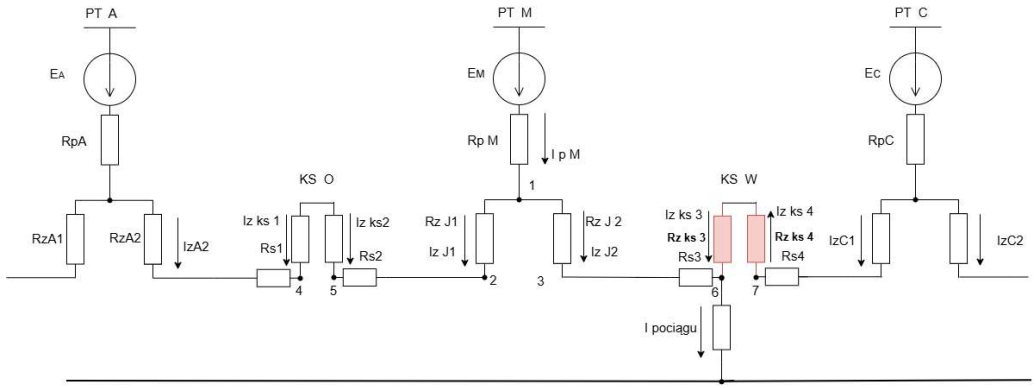


2. Teoria – Etap I

Konfiguracje najbardziej niekorzystne



PT: pociąg pod podstacją, sąsiednia sekcja nieobciążona



KS: pociąg pod kabiną, prąd dzielony 50/50

PT: jeden zasilacz przewodzi cały prąd

ΔU = I·R_max → kryterium R_max

KS w środku odcinka zasilania

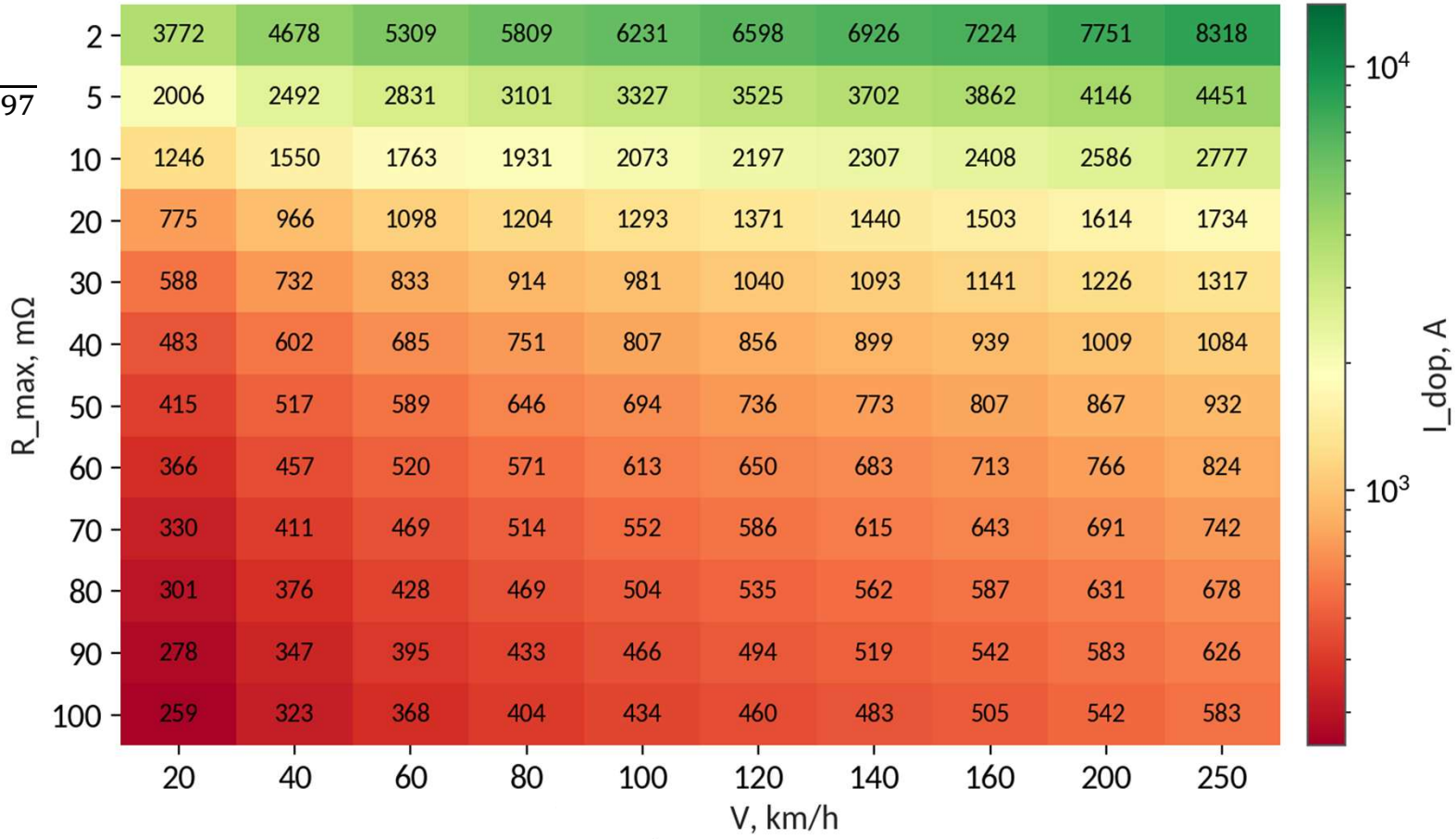
ΔU = (I/2)·R_sum → kryterium R_sum

- Symetria rezystancji zasilaczy nie zmniejsza ΔU w najgorszym przypadku; jeden pociąg w strefie; zasilacze kablowe AL 2×500 mm²
- Podstawienie ΔU = I·R do modelu potęgowego daje I_dop jako funkcję R i V

Tablica projektowa – podstacja trakcyjna (R_max)

$$I_{dop} = 11638 \cdot \frac{V}{\Delta U^{2.097}}$$

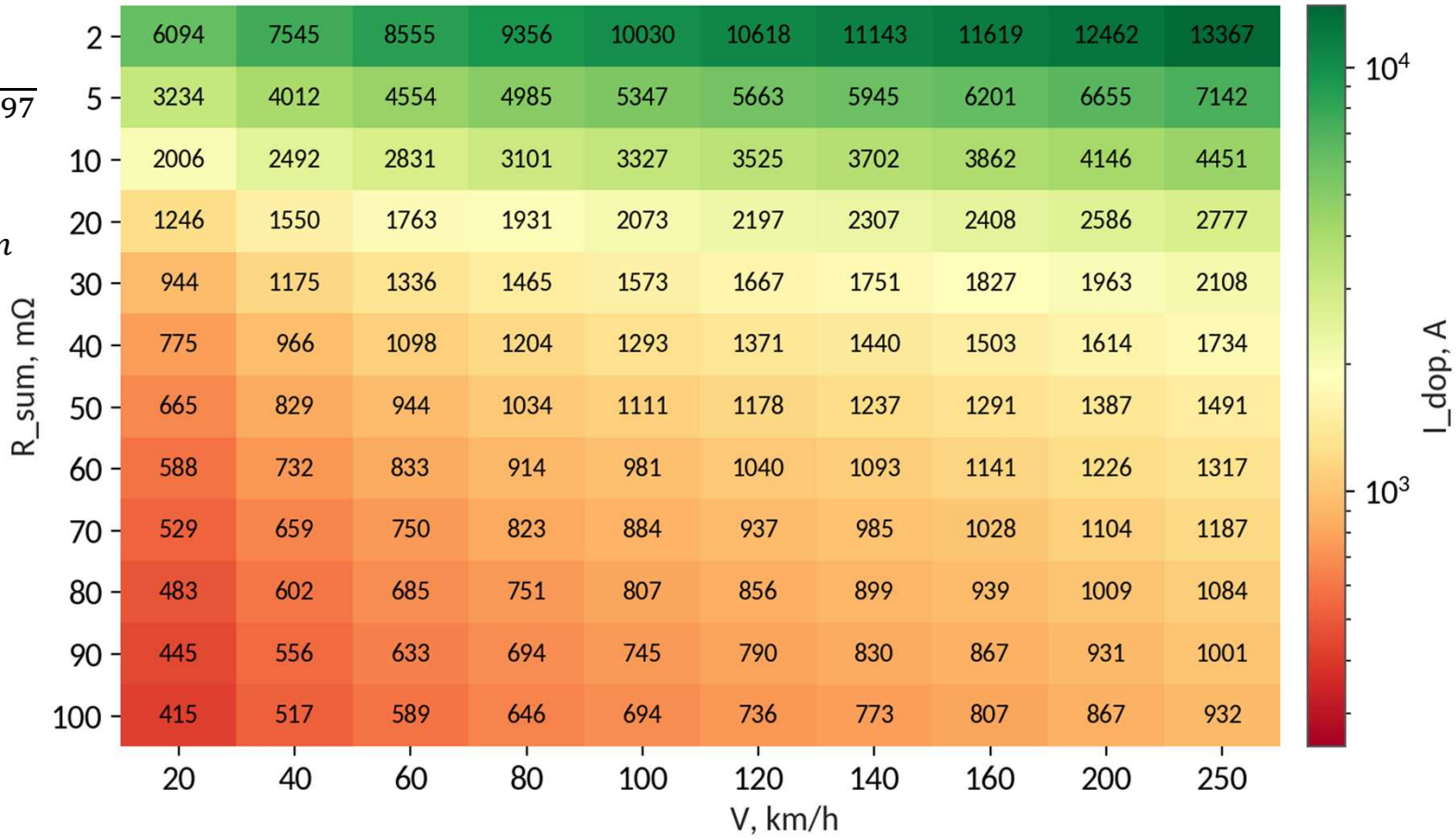
$$\Delta U_{PT\,max} = I \cdot R_{max}$$



Tablica projektowa – kabina sekcyjna (R_sum)

$$I_{dop} = 11638 \cdot \frac{V}{\Delta U^{2.097}}$$

$$\Delta U_{KS\,max} = I/2 \cdot R_{sum}$$



Przykład obliczeniowy – przęsło izolowane

PT „M”: zasilacze J1 = 72 m, J2 = 164 m (AL 2×500 mm², 0,03025 mΩ/m) → R_max = 4,961 mΩ

V [km/h]	20	40	60	80	100	120	140	160	200	250
I_dop [A]	2017	2506	2847	3117	3345	3544	3722	3883	4168	4475

KS „W”: zasilacze Z_ks3 = 140 m, Z_ks4 = 27 m → R_sum = 4,235 + 0,817 = 5,052 mΩ

V [km/h]	20	40	60	80	100	120	140	160	200	250
I_dop [A]	3211	3984	4522	4950	5309	5623	5903	6158	6608	7092

Podobna rezystancja (4,96 i 5,05 mΩ), a I_dop przy KS jest o ok. 59 % większy **(stosunek ≈ 1,59 ≈ $\sqrt[3]{4}$)**
Podział prądu 50/50 zmniejsza ΔU o połowę i działa nieliniowo poprzez d_th i t_th

Krótkie zasilacze kablowe przyłączone przy przęśle – przypadek ilustracyjny; h_1 = 6,3 m, h_2 = 5,2 m, L = 93 m, tg θ = 0,01183, E_dop = 80 J [opracowanie własne]

2. Teoria – Etap I

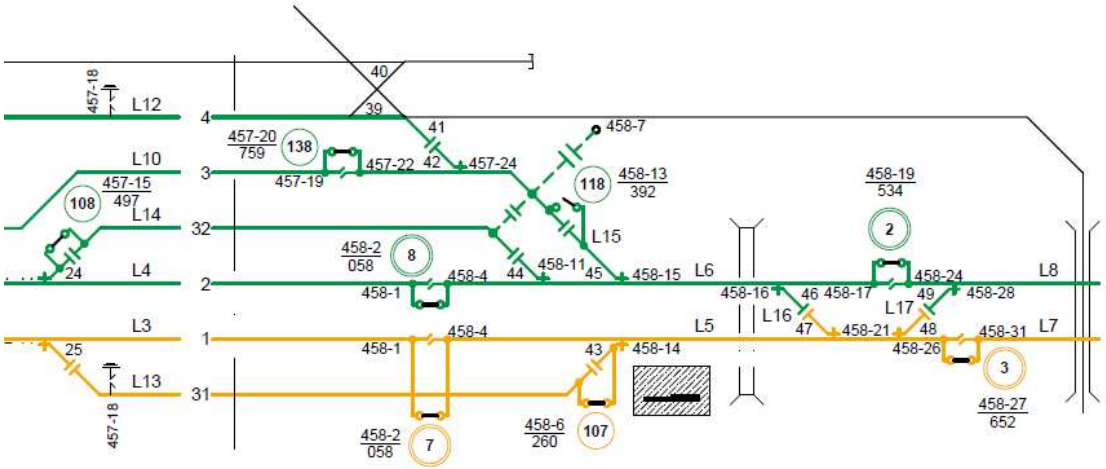
Izolatory sekcyjne a izolowane przęsło naprężenia

Parametr	Przęsło izolowane	Izolator sekcyjny
Mechanizm gaszenia łuku	brak – łuk między nakładką a przewodem	zaprojektowany (rogi opalne)
Energia dopuszczalna E_dop	80 J	400 J (elementy w strefie łuku nie są naprężone)
Zamykanie się przerwy	d(t) = V·t·tg θ	d(t) = V·t – przy pełnej prędkości
Czas krytyczny	t_th = d_th / (V·tg θ)	t_th = d_th / V – krótszy łuk
Źródło ΔU	rezystancje zasilaczy PT/KS	różne rezystancje sieci toru głównego i stacyjnego
Przypadek obliczeniowy	R_max (PT), R_sum (KS)	cały prąd pociągu przez sekcję o R_max

Izolator jest zbocznikowany sekcjami sieci – **rozstrzyga rezystancja sekcji toru stacyjnego** (przypadek zachowawczy: izolator w pobliżu PT)

2. Teoria – Etap I

Przykład obliczeniowy – izolator sekcyjny nr 25



Schemat sekcjonowania stacji z izolatorem nr 25 [PKP PLK]

Sekcja	Typ sieci	l [m]	R [mΩ]
L3 (główna)	YpC120-2C	1340	98,89
L13 (stacyjna)	SKB70-C	1038	134,21

Kryterium: R_max = 134,21 mΩ (L13)
E_dop = 400 J

V [km/h]	20	40	60	80	100	120	140	160	200	250
I_dop [A]	1509	1895	2166	2381	2562	2721	2863	2992	3220	3466

Nawet dla sekcji stacyjnej o dużej rezystancji I_dop ≥ 1,5 kA w całym zakresie prędkości 20–250 km/h

2. Teoria – Etap I

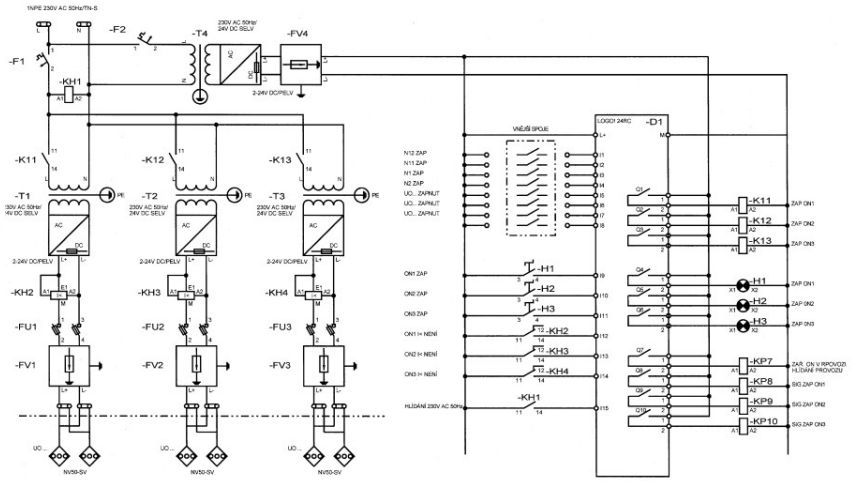
Praktyka europejskich zarządców infrastruktury

Kraj / zarządca	System zasilania	Zasada na sekcjach rozdzielczych
Francja (SNCF Réseau, EPSF)	25 kV AC, 1,5 kV DC	Wyłącznik główny otwarty; opuszczenie pantografu przy zmianie systemu; automatyzacja przez punkty KVB / TVM / SILEC
Niemcy (DB InfraGO)	15 kV 16,7 Hz AC	Wyłączenie przy El 1, załączenie przy El 2; El 3/El 4 – opuszczenie pantografu
Włochy (RFI)	3 kV DC	Sekcjonowanie projektowane do przejazdu z poborem prądu; izolatory sekcyjne z rogami opalnymi
Czechy (SŽ)	3 kV DC	Przejazd z podniesionym pantografem dozwolony, o ile warunkowy sygnał świetlny nie nakazuje opuszczenia

Źródła: EPSF SAM E 009 (2013); DB Ril 301 (2025); RFI Istruzione TE (2018); SŽ D1 (2025), SŽ PPD 01/2025

Żaden z zarządców sieci DC nie stosuje jawnej reguły ograniczenia prądu dla zbocznikowanych elementów sekcjonowania

Rozwiązanie czeskie (SŽ)



Sygnał i schemat sterowania [SŽ D1; Kupczyn J.]

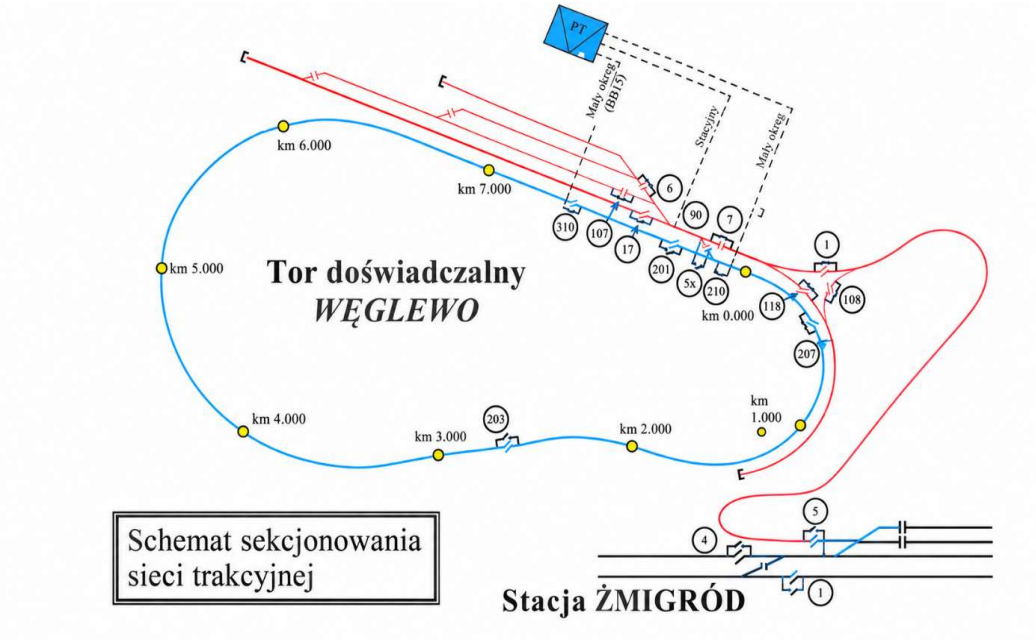
- **Część świetlna zapalana tylko w razie potrzeby** – sterownik wykrywa stan zasilania, który może wytworzyć ΔU (np. wyłączony zasilacz)
- Sygnał ciemny → normalny przejazd z poborem prądu
- SŽ D1 art. 399(13) – hierarchia: **ograniczyć prąd → wyłączyć prąd → zerowy pobór → opuścić pantograf**
- Bliski odpowiednik kryterium zależnego od rezystancji i stanu zasilania proponowanego w pracy 5180

Wnioski z Etapu I

1. Dla wszystkich analizowanych obiektów (PT „M”, KS „W”, izolator nr 25) przy V = 20 – 250 km/h **zniesienie obowiązku jazdy bezprądowej jest uzasadnione.**
2. Kryterium dla zbocznikowanych przęseł jest **rezystancja zasilaczy**: R_max przy PT, R_sum przy KS.
3. KS daje większy I_dop niż PT dzięki podziałowi prądu między dwa zasilacze.
4. Dla izolatorów sekcyjnych ΔU wynika z rezystancji sieci jezdnej; rozstrzyga sekcja toru stacyjnego.
5. I_dop należy wyznaczać **indywidualnie dla każdego obiektu** z rzeczywistymi rezystancjami.
6. Przy rekuperacji łuk zależy od prądu tak samo jak przy jego poborze ($E \approx \Delta U \cdot I \cdot t$) – zaleca się blokadę rekuperacji, chyba, że układ sterowania pojazdu gwarantuje szybkie ograniczenie prądu do I_dop.
7. **Gdzie przęsła nie są zbocznikowane szynami DC, jazda bezprądowa pozostaje konieczna**

Tor doświadczalny IK w Żmigrodzie – miejsce pomiaru

rozłącznik 203 (km 3,000)



Zasilacze przez rozłączniki 310 i 210 po obu stronach przęsła; 203 dzieli pętlę

Schemat poglądowy wg rys. 3.2 raportu Etapu II (pętla Węglewo) [IK]



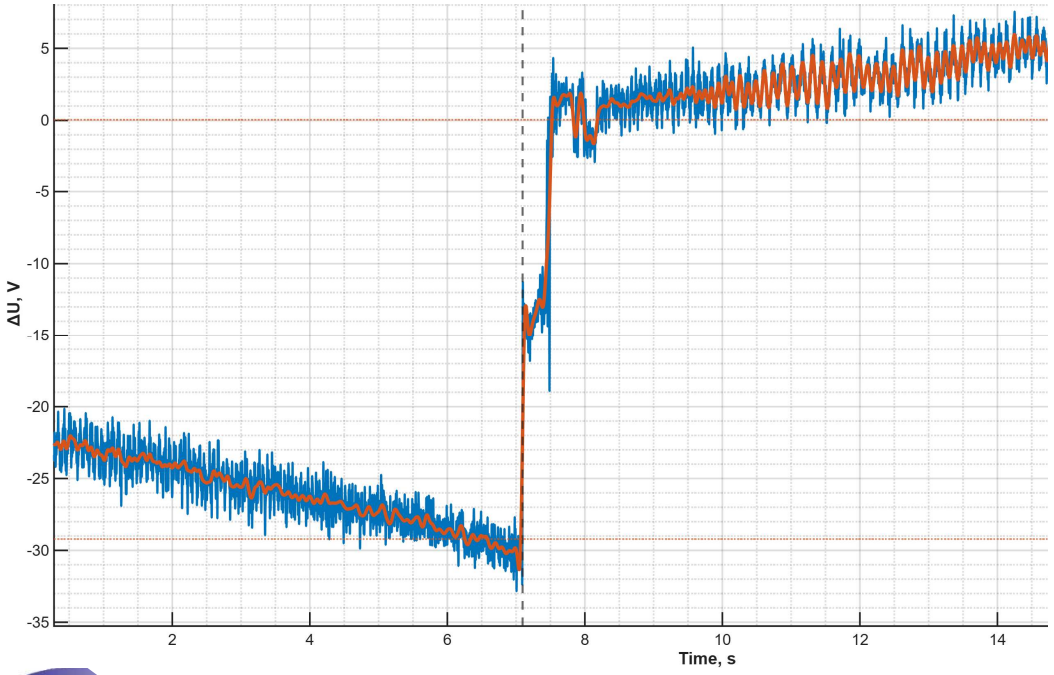
Stanowisko pomiarowe: sondy WN na przewodach jezdnych po obu stronach przęsła, rejestrator przy słupie z napędem rozłącznika 201 [fot. IK]

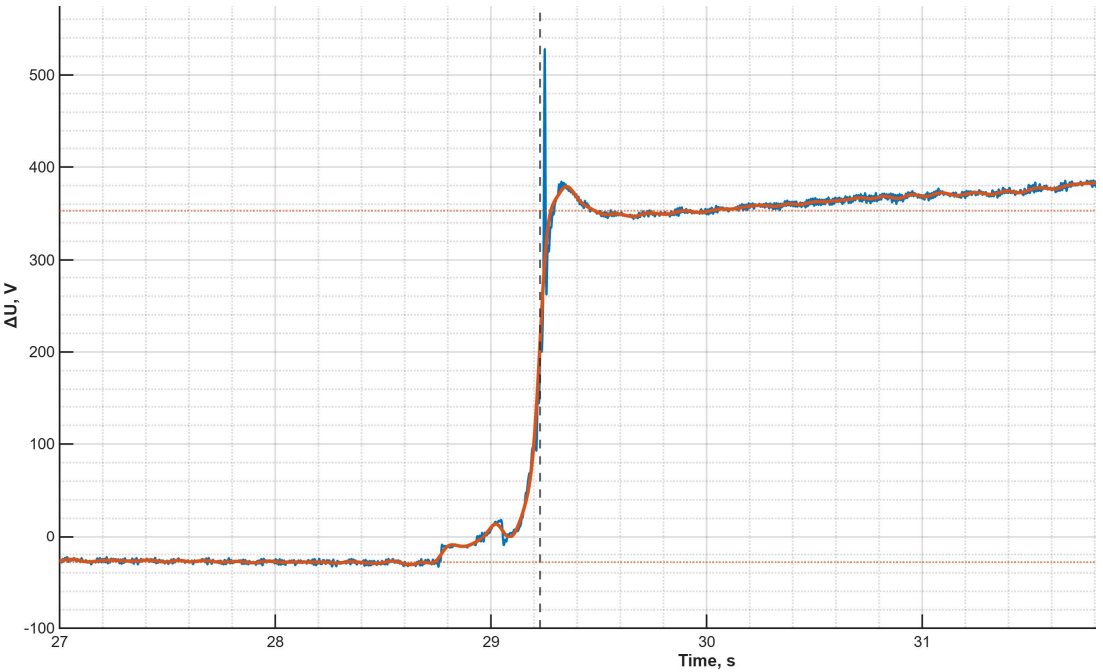


Rejestrator HIOKI MR8875, próbkowanie 10 µs [fot. IK]

Żmigród: przęsło zbocznikowane i niezbocznikowane

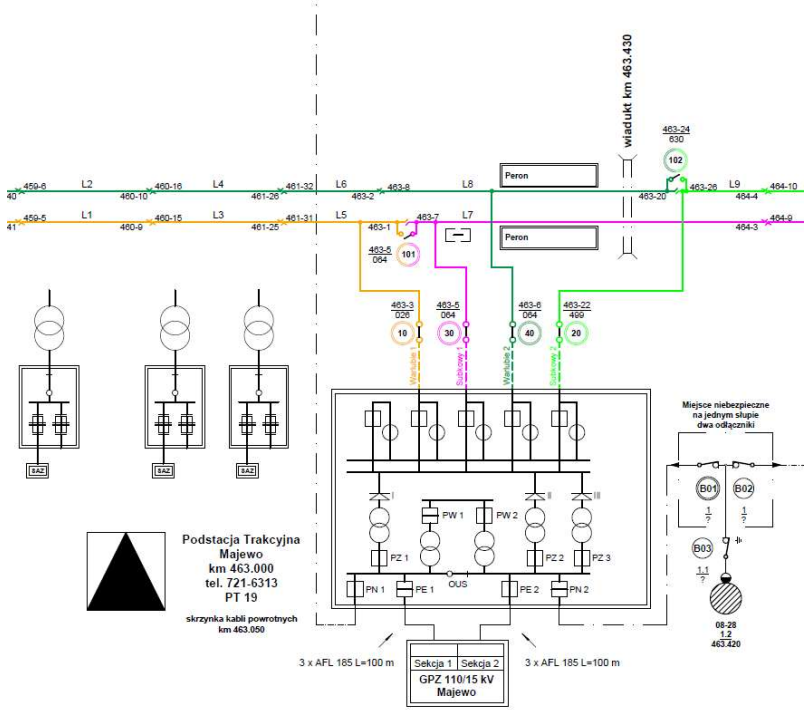
1. 16 przejazdów, 500–2000 A, cztery konfiguracje układów przełączeniowych.
2. Zasilanie przez dwa zasilacze: spadek napięcia (ΔU) tylko 9 – 52 V, stany przejściowe < 95 V.
3. Zasilanie z jednego zasilacza: **spadek napięcia (ΔU) 350 – 530 V** – odbiór prądu niemożliwy, konieczne zachowanie odcinków bezprądowych



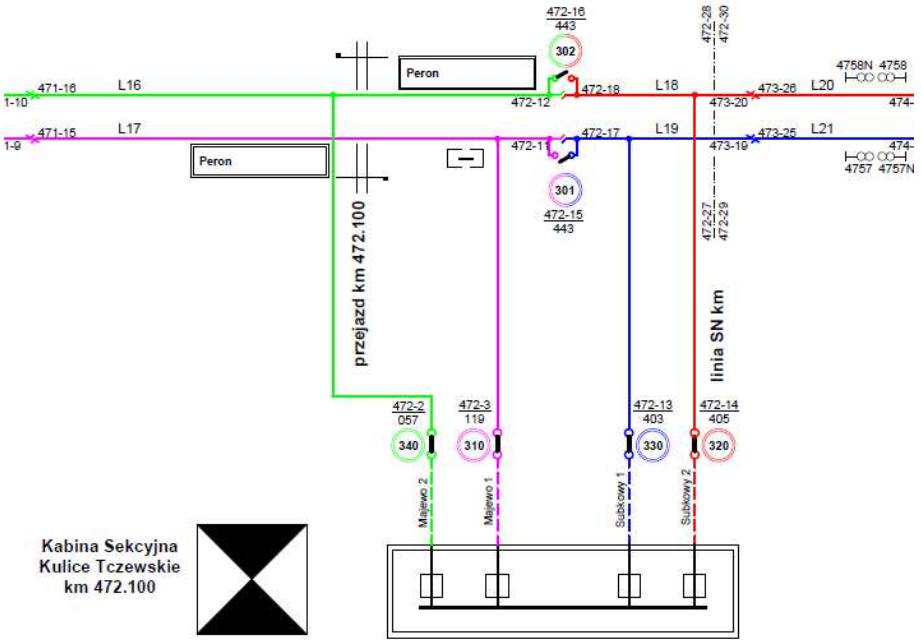


3. Weryfikacja – Etap II

Badania na linii nr 131, 23–24 sierpnia 2026 r.



PT Majewo (km 463,000) – przęsło przy odłączniku 102 (km 463,630), sekcje L8/L9



KS Kulice Tczewskie (km 472,100) – przęsło przy odłączniku 302, sekcje L16/L18

Odłączniki 102 i 302 otwarte – przęsła zbocznikowane wyłącznie szynami 3 kV DC. Schematy: PKP PLK

3. Weryfikacja – Etap II

Zasilacze, rezystancje i program jazd

Obiekt	Zasilacz	Kabel / linia	Sieć jezdna do przęsła	R [mΩ]
PT Majewo	Warlubie 2	kabel 1×500, 98 m	YpC120-2C, 566 m	47,7
PT Majewo	Subkowy 2	kabel 2×500, 512 m	–	15,5
KS Kulice	Majewo 2	kabel 1×500, 114 m	YpC120-2C, 442 m	39,5
KS Kulice	Subkowy 2	2×AFL-6 300 m + kabel 27 m	YpC120-2C, 38 m	27,1

Kryteria: PT Majewo R_max = 47,7 mΩ (R_sum = 63,2 mΩ); KS Kulice R_sum = 66,6 mΩ
Rezystancję liczy się od szyn DC do przęsła – łącznie z odcinkiem sieci jezdnej od punktu przyłączenia kabla

Rezystancje dla 20 °C: kabel 1×500 mm² – 0,0605 Ω/km; 2×AFL-6 – 0,0786 Ω/km; YpC120-2C – 0,0738 Ω/km

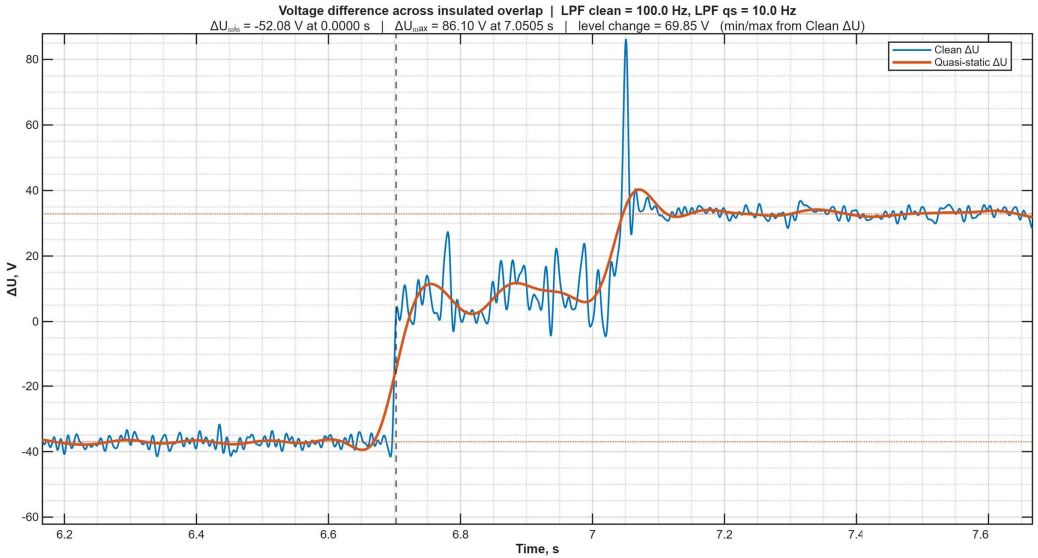
Ozn.	I [A]	Kier.
J1	550	do
J2	531	od
J3	1052	do
J4	1265	od
J5	1385	do
J6	1465	od

Ozn.	I [A]	Kier.
K1	670	do
K2	641	od
K3	1241	do
K4	1042	od
K5	1615	do
K6	1119	od

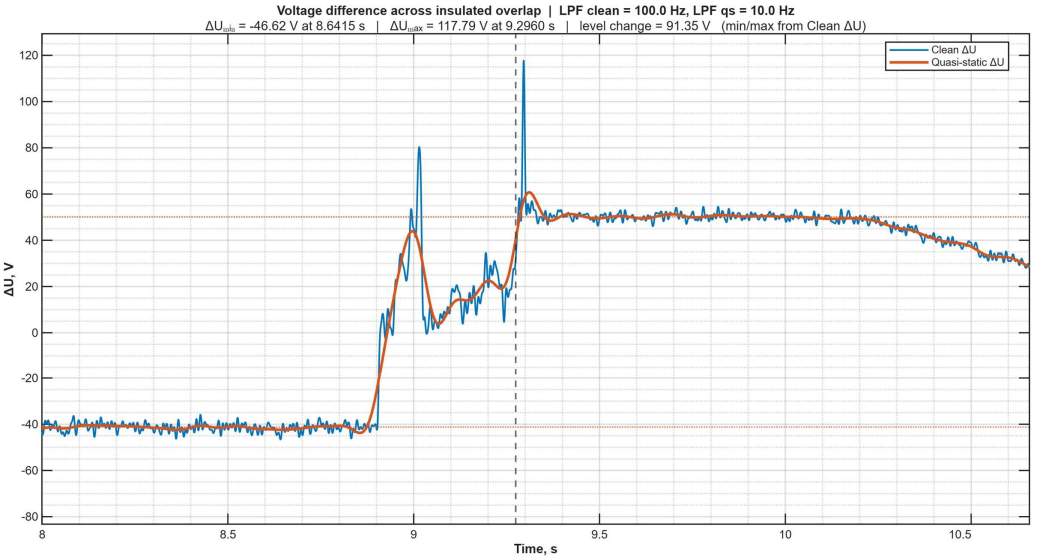
- Prąd utrzymywany podczas przejazdu przez przęsło, bez wyłączania
- Pojazd z pantografem o profilu ślizgacza wg PN-EN 50367

3. Weryfikacja – Etap II

Wyniki: PT Majewo



J3: I = 1052 A, kierunek „do”



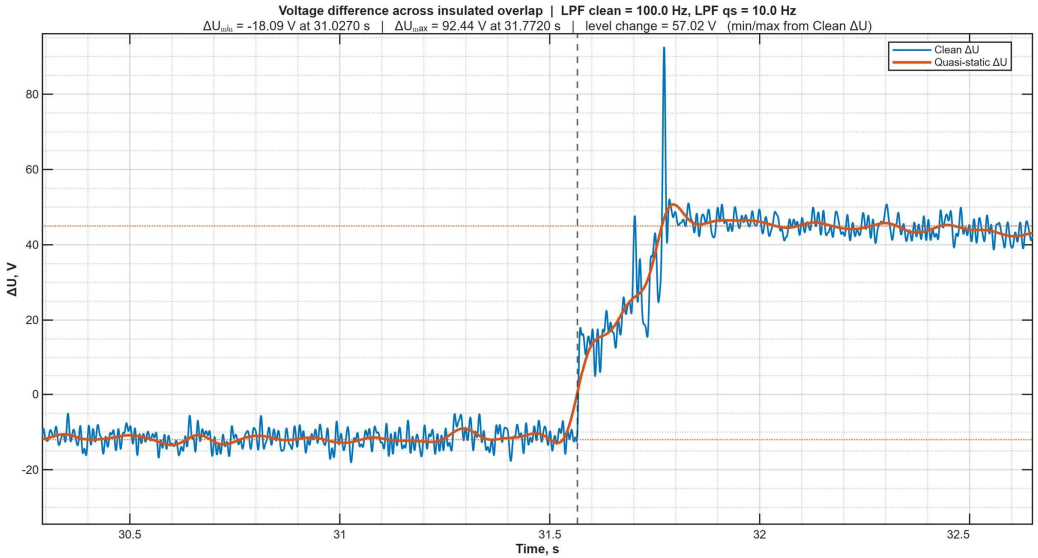
J5: I = 1385 A, kierunek „do”

Przejazd	J1	J2	J3	J4	J5	J6
I [A]	550	531	1052	1265	1385	1465
ΔU przed [V]	−41,3	15,3	−37,0	32,3	−41,0	45,3
ΔU po [V]	−9,1	−21,5	32,9	−10,0	50,3	5,2
|ΔU|max [V]	41,3	21,5	37,0	32,3	50,3	45,3

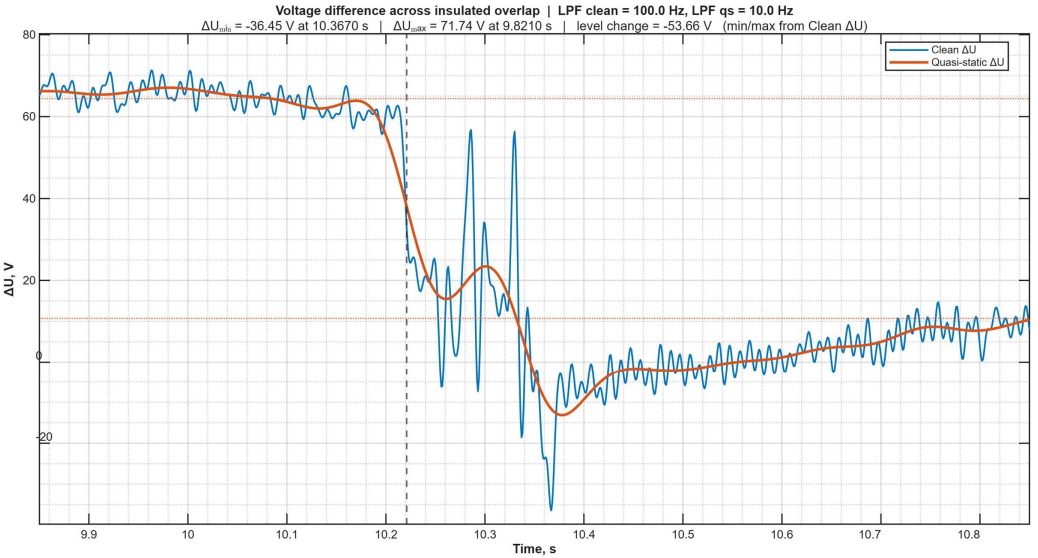
- Skok 32–91 V, stan przejściowy 10–50 ms, chwilowo do 118 V (J5)
- Znak skoku zależy od kierunku jazdy
- J3, J5: poziom pośredni 10–20 V przez ok. 0,3 s – ślizgacz mostkuje oba przewody

3. Weryfikacja – Etap II

Wyniki: KS Kulice Tczewskie



K3: I = 1241 A, kierunek „do”



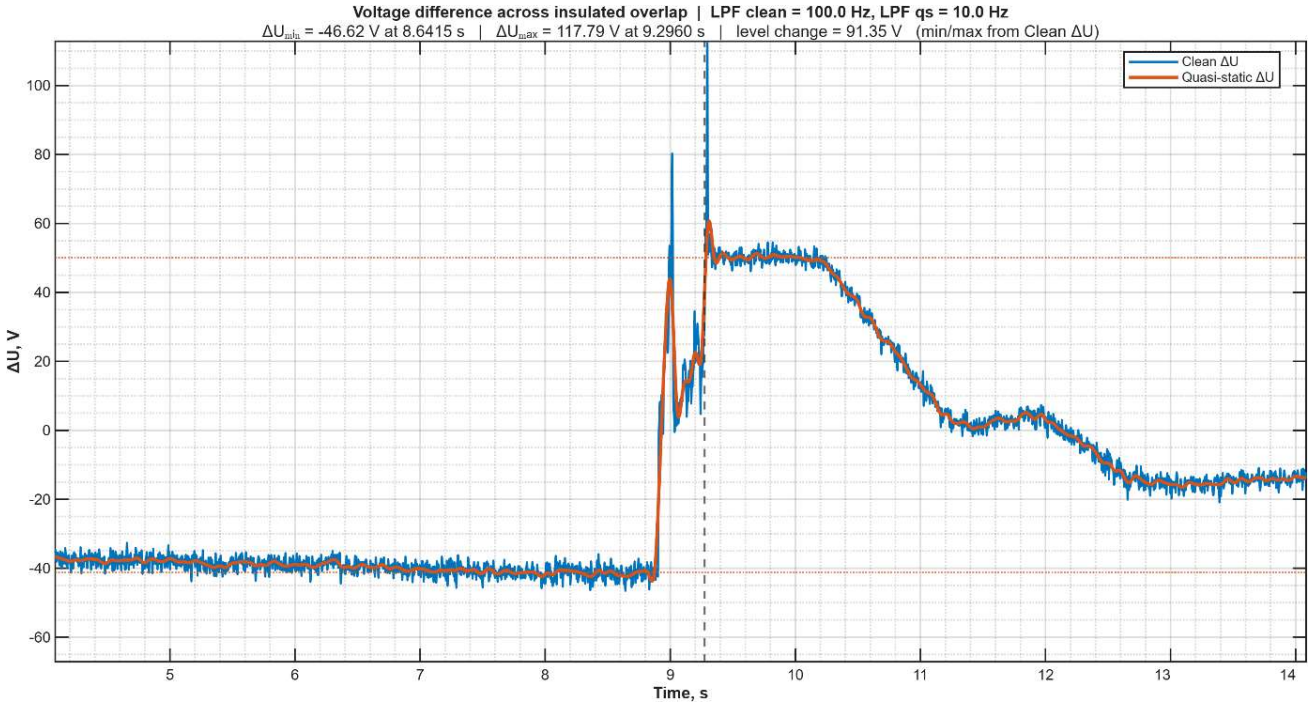
K6: I = 1119 A, kierunek „od”

Przejazd	K1	K2	K3	K4	K5	K6
I [A]	670	641	1241	1042	1615	1119
ΔU przed [V]	34,6	3,5	−12,0	50,2	−6,9	64,2
ΔU po [V]	4,7	18,2	45,0	−2,9	52,6	10,5
|ΔU|max [V]	34,6	18,2	45,0	50,2	52,6	64,2

- Skok 15–58 V, stan przejściowy chwilowo do 92 V (K3)
- Poziomy niesymetryczne (np. K4: +50 / −3 V) – inne pociągi w sekcjach; nie wpływa na skok
- K5, K6: poziom pośredni 18–23 V przez ok. 0,1 s

3. Weryfikacja – Etap II

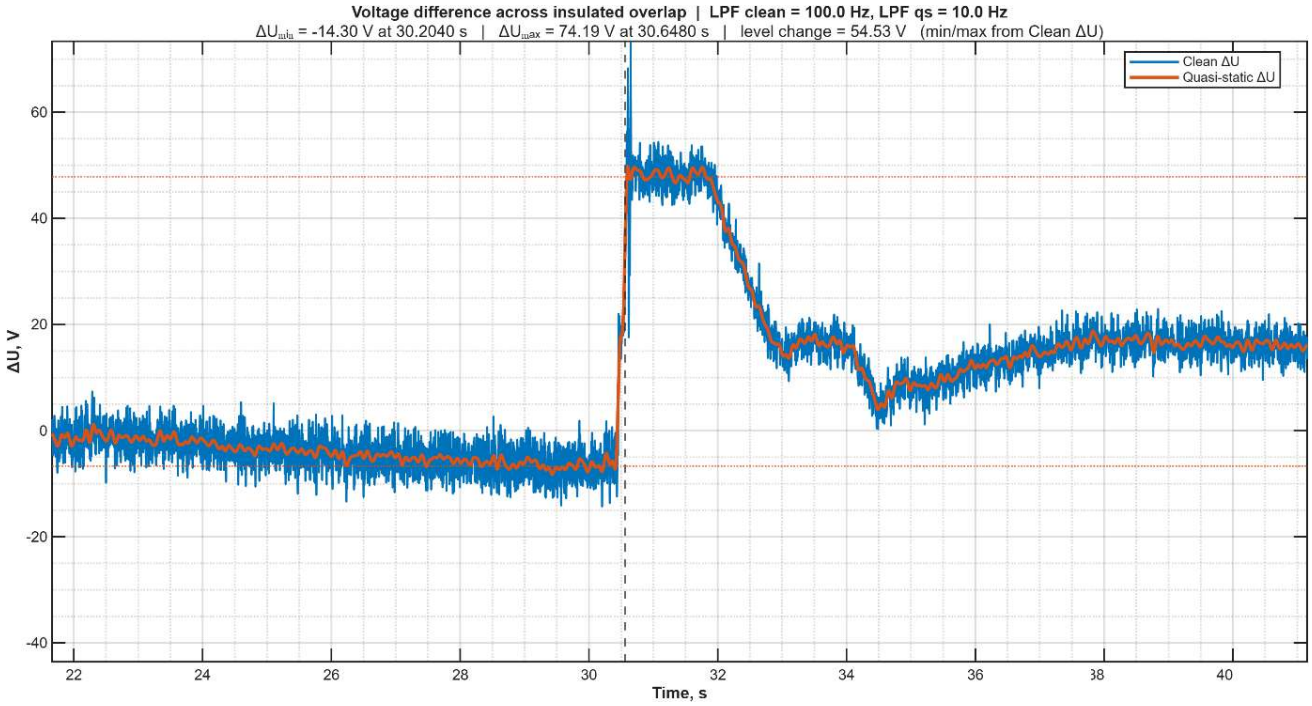
Łuk zarejestrowany – PT Majewo
J5, I = 1385 A





3. Weryfikacja – Etap II

Łuk zarejestrowany – KS Kulice Tczewskie
K5, I = 1615 A





3. Weryfikacja – Etap II

Czy jazda bezprądowa jest wymagana? Ocena 12 jazd

Ozn.	I [A]	|ΔU|max [V]	I_dop [A]	Jazda bezprądowa
J1	550	41,3	716	niewymagana
J2	531	21,5	716	niewymagana
J3	1052	37,0	716	wymagana
J4	1265	32,3	716	wymagana
J5	1385	50,3	716	wymagana
J6	1465	45,3	716	wymagana
K1	670	34,6	914	niewymagana
K2	641	18,2	914	niewymagana
K3	1241	45,0	914	wymagana
K4	1042	50,2	914	wymagana
K5	1615	52,6	914	wymagana
K6	1119	64,2	914	wymagana

Kryterium rezystancyjne Etapu I: E_dop = 80 J, V = 100 km/h; PT – R_max = 47,7 mΩ, KS – R_sum = 66,6 mΩ

Jak zwiększyć I_dop?

- PT Majewo: przyłączenie kabla Warlubie 2 przy prześle → R_max 47,7 → 15,5 mΩ (poniżej wartości wymaganej dla 1500 A)
- KS Kulice: przyłączenie kabla Majewo 2 przy prześle → R_sum 66,6 → 34,0 mΩ (dopuszcza 1000 A)

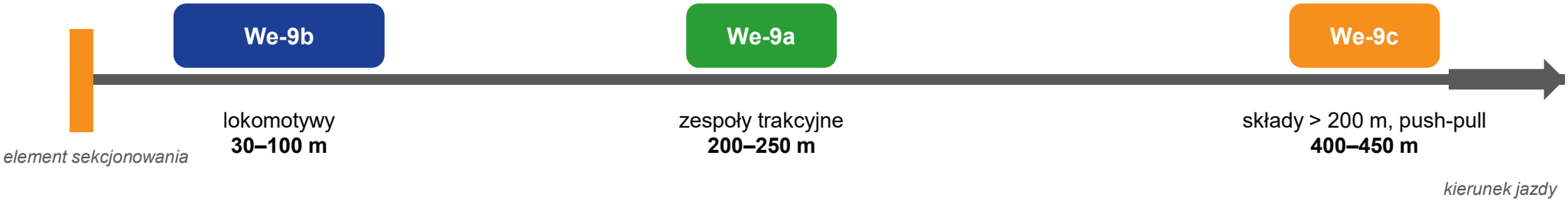
Obserwacje łuku

- Łuk zapala się przy wszystkich prądach w chwili odejścia ślizgacza od przewodu sekcji opuszczanej
- Bez przedłużonego palenia się łuku i bez zakłóceń zasilania – także powyżej I_dop
- E_dop = 80 J jest kryterium konserwatywnym; do czasu kalibracji pozostaje wartością projektową

4. Unifikacja i znoszenie wskaźników – Etap III

Wskaźniki pantografowe – stan obecny

We-9 ma trzy warianty a/b/c, rozmieszczane według położenia pantografu w składzie.
We-8a/b/c (30–80 m przed elementem sekcjonowania) różnicują tylko kierunek toru.



- Treść polecenia we wszystkich wariantach jest tożsama; tabliczki „L” i „400” jedynie adresują wskaźnik do typu taboru
- Trzy odległości kompensują położenie pantografu względem czoła pociągu – od kilkunastu metrów do ok. 400 m

4. Unifikacja i znoszenie wskaźników – Etap III

Zmniejszenie liczby wskaźników

Obecne bezpieczne – (400–450 m, czoło pociągu)

- Bezpieczne dla wszystkich klas taboru, także push-pull z lokomotywą na końcu
- Zachowuje obecną filozofię Ie-1 (mijanie czołem pociągu)
- Nie wymaga wyposażenia pokładowego – stosowalne na całej sieci
- Koszt: dłuższa jazda bezprądowa lokomotyw i krótkich EZT

Docelowe – (30–50 m, ostatni pantograf)

- Maszynista podnosi pantograf / zamyka obwód po przejechaniu od wskaźnika drogi równej odległości ostatniego pantografu od czoła
- Warunki: (a) informacja o położeniu pantografu, (b) pomiar przebytej drogi w pojazdach z pantografem oddalonym od kabiny, (c) przeszkolenie maszynistów
- Na liniach z ETCS (warunki toru) – możliwa realizacja samoczynna

Strefy jazdy bezprądowej. Czy zawsze są niezbędne?

Podsumowanie

Stan problemu	Co proponujemy	Kierunki dalszego rozwoju
• Jazda bezprądowa stosowana jednolicie, także przy elementach zbocznikowanych szynami 3 kV DC • Skutki: dodatkowa energia na rozruch (w symulacji +2,2 %), utracona rekuperacja, dłuższy czas jazdy, ryzyko zatrzymania • Przepisy (§ 113 Rozporządzenia, Ie-1) nie przewidują gradacji reżimów przejazdu	• Kryterium $E = I \cdot \Delta U \cdot t \leq 80$ J → I_dop(V, R) i tablice R_max (PT), R_sum (KS) • Potwierdzenie na LK 131: ΔU wywołuje prąd pociągu; PT Majewo 716 A, KS Kulice 914 A (100 km/h) • Zwiększenie I_dop przez przyłączenie kabli zasilaczy przy przęśle	• Świetlny We-8 aktywowany stanem zasilania – rozwiązanie czeskie SŽ z zasadą fail-safe (R10) • Eksploatacja próbna ≥ 12 mies. na LK 131 (R11) • Próby z rekuperacją, jednoczesna rejestracja prądu pojazdu • Docelowo W2 i wsparcie ETCS (warunki toru) • Dalsze badania oddziaływania łuku na sieć jezdną – weryfikacja E dopuszczalnego (przewód, izolator sekcyjny, sieć sztywna)

Dziękuję za uwagę