

Włodzimierz Wolny*

Akademia Humanistyczno-Ekonomiczna w Łodzi

e-mail: w.wolny@wp.pl**Maciej Puchała**** <https://orcid.org/0000-0001-7723-1913>

Akademia Humanistyczno-Ekonomiczna w Łodzi

e-mail: m_puchala@wp.pl**Innowacyjne procedury prowadzenia lokomotywy elektrycznej**https://doi.org/10.25312/2391-5129.37/2023_13WWMP

W artykule zawarto rys historyczny urządzeń sterowania ruchem kolejowym używanych w przeszłości. Dały one podwaliny do skonstruowania kolejnych, udoskonalonych urządzeń mających decydujący wpływ na bezpieczeństwo ruchu kolejowego. Omówiono sygnalizację kształtową, która z drobnymi zmianami jest do dziś szeroko stosowana na całym świecie. Poświęcono również uwagę sygnalizacji świetlnej, dokonano porównania sygnalizacji świetlnej obowiązującej w Polsce i Niemczech. Następnie skupiono się na opisie prowadzenia ruchu pociągów w oparciu o blokadę półsamoczną i samoczną. W pracy zostały przybliżone dwa systemy bezpieczeństwa prowadzenia ruchu kolejowego: system SHP (Samoczynne Hamowanie Pociągu) oraz PZB (Punktowe Oddziaływanie na Pociąg). Znaczna część pracy została poświęcona wdrażanemu w całej Europie i poza nią systemowi ETCS. Scharakteryzowano zasadę działania, poziomy nadzoru oraz tryby pracy systemu. Postanowiono zbadać wpływ stylu prowadzenia pociągu na zużycie energii oraz ocenić, czy w praktyce przyniesie to wymierne efekty w postaci oszczędności energii.

Słowa kluczowe: sterowanie ruchem kolejowym, bezpieczeństwo ruchu pociągów, oszczędność energii

* Włodzimierz Wolny – maszynista pojazdów trakcyjnych, prowadzący pojazdy PKP.

** Maciej Puchała – doktor nauk technicznych specjalizujący się w zakresie systemów informatycznych stosowanych w transporcie i logistyce. Od kilku lat jest już emerytowanym nauczycielem akademickim.

Wprowadzenie

W artykule zawarto rys historyczny urządzeń sterowania ruchem kolejowym używanych w przeszłości. To doświadczenie dało podwaliny do skonstruowania kolejnych, udoskonalonych urządzeń mających wpływ na bezpieczeństwo. Omówiono sygnalizację kształtową, której pierwowzorem był stworzony przez braci Chappe telegraf optyczny, służący do porozumiewania się za pomocą znaków optycznych. Telegraf Chappe'a został pokazany po raz pierwszy we Francji w 1792 roku. Ulepszona przez Jana Baranowskiego sygnalizacja kształtowa z drobnymi zmianami jest do dziś szeroko stosowana na całym świecie. Postęp techniki wymusił na konstruktorach stworzenie nowego rodzaju sygnalizacji, a mianowicie sygnalizacji świetlnej. Obszerna część artykułu została poświęcona systemowi ETCS, wdrażanemu w całej Europie, a także poza nią. Scharakteryzowano poszczególne zasady jego działania oraz poziomy nadzoru. Ponadto omówiono w formie opisowej i obrazowej polecenia i informacje przekazywane za pomocą DMI oraz tryby pracy systemu ETCS. Kolejnym wątkiem poruszonym w artykule jest wpływ stylu prowadzenia pociągu na zużycie energii. Postanowiono między innymi sprawdzić, czy wdrożenie zasad ekonomicznego stylu prowadzenia pociągu w praktyce przyniesie wymierne efekty w postaci oszczędności energii.

Początki systemów sterowania ruchem kolejowym

Początkowo kolej żelazna wywoływała wśród ludzi wiele obaw i uprzedzeń. W Anglii utworzyła się nawet kampania antykolejowa, była ona aktywna w prasie oraz w Izbie Gmin. Uważano, że wystraszone krowy przestaną jeść trawę i dawać mleko, a kury przestaną się nieść, natomiast dym wydobywający się z parowozów potruje ptaki. Początek kolei żelaznych to era szybszych i bardziej komfortowych podróży, a także zdecydowanie większej dostępności transportu dla całego społeczeństwa niż w czasach poprzednich.

Należy jednak pamiętać, że wprowadzenie nowego środka transportu znacznie zwiększyło też prawdopodobieństwo wystąpienia groźnych wypadków komunikacyjnych. Wymusiło to na konstruktorach parowozów oraz na budowniczych infrastruktury kolejowej obranie jako priorytetu bezpieczeństwa kolei dla podróżnych i wszystkich osób z nią związanych. Aby uniknąć zderzenia czołowego pociągów bądź najechania na tył innego pociągu, zaczęto stosować różne rozwiązania. Na odcinkach, gdzie pociągi mogły poruszać się tylko w jednym, ustalonym i niezmiennym kierunku, stosowano odstępy czasowe. Znacznie bezpieczniejsze było wyprawianie pociągów w odstępie drogi, linia została podzielona na szlaki i odstępy. Każdy odstęp był ochraniały sygnałami, których nastawienie na sygnał „Wolna droga” było możliwe tylko wtedy, gdy odcinek nie był zajęty przez żaden pociąg – w myśl zasady, że na jednym odcinku bądź szlaku może znajdować się tylko jeden pociąg. Dodatkowo

skład mógł zostać wyprawiony na szlak lub odstęp w momencie, kiedy poprzedni skład w całości, wraz z sygnałami końca pociągu, dotarł do posterunku następnego.

Porozumiewanie pomiędzy stacjami ze względu na znaczne odległości odbywało się za pomocą dzwonów sygnałowych, telegrafu, urządzeń blokady liniowej bądź telefonicznie. Na liniach o ruchu zmiennie-kierunkowym, na przykład jednotorowych dwukierunkowych, stosowano kilka rozwiązań zależnie od kraju. Jednym z nich jest tak zwany ruch pociągów z zachowaniem punktów krzyżowań. Metoda ta polega na tym, że każdy pociąg może wyjechać na szlak ze stacji planowego krzyżowania, które jest ujęte w rozkładzie jazdy pod warunkiem, że skład z kierunku przeciwnego przybył na tę stację. W przeciwnym wypadku musi na niego czekać albo do dalszej jazdy otrzymać wymagane pisemne zezwolenie.

Kolejnym sposobem regulacji ruchu kolejowego jest zasada ruchu pociągów z zachowaniem pierwszeństwa kierunku. Charakteryzuje się ona tym, że wyprawiane bez pozwolenia mogą być pociągi tylko jednego kierunku, który jest ustalony przez właściwą dyrekcję kolei. Aby wyprawić pociąg kierunku przeciwnego, wymagane jest pisemne zezwolenie zawiadowcy stacji, do której pociąg ma być wyprawiony. Zezwolenie to powinno być przesłane pociągiem jadącym z kierunku posiadającego pierwszeństwo. Dzięki temu rozwiązaniu to dyżurny ruchu stacji wyprawiającej pociągi w kierunku z pierwszeństwem jest odpowiedzialny za ruch między dwiema sąsiednimi stacjami.

Stosowano również jazdę z przewodnikiem (pilotem). Taka jazda cechowała się tym, że dla każdego szlaku zawierającego się pomiędzy stacjami linii jednotorowej był przydzielony pracownik, bez którego żaden pociąg nie mógł zostać wyprawiony ze stacji na szlak. Jazda mogła odbywać się tylko z wyżej wymienioną osobą. Jeżeli na skutek sytuacji ruchowej zaistniała potrzeba wyprawienia kilku pociągów, jeden za drugim w tym samym kierunku, przewodnik (pilot) wydawał pozwolenie za pomocą rozkazu szczególnego (pisemnego) wszystkim prowadzącym pojazd kolejowy, z wyjątkiem ostatniego pociągu, który musiał sam przeprowadzić. Ciągły rozwój ruchu kolejowego powodował często braki personelu do pracy na stanowiskach związanych z zabezpieczeniem ruchu kolejowego, dlatego zaczęto stosować tak zwaną jazdę na berło. Berło wyjęte z przyrządu upoważniało maszynistę do wyjazdu na linię. Wyjęcie kolejnego berła z któregokolwiek urządzenia było niemożliwe, dopóki wyciągnięte uprzednio nie zostało włożone do tożsamego urządzenia na następnej stacji. Dopiero wówczas możliwe było wyciągnięcie berła. Maszynista każdego pociągu wyprawianego na szlak lub odstęp musiał posiadać berło.

Przełomowym momentem w poprawie płynności, a zarazem bezpieczeństwa ruchu kolejowego było zastosowanie wynalazku braci Chappe. Telegraf Chappe'a był urządzeniem do porozumiewania się za pomocą znaków optycznych. Telegraf optyczny wywarł ogromny wpływ na rozwój kolei i tworzenie systemów sygnalizacji kolejowej stosowanej z drobnymi różnicami na całym świecie.

Warto również podkreślić, że twórcą semafora, którego wskazania były uzależnione od ustawienia zwrotnic, był Polak, Jan Józef Baranowski. Semafor

Baranowskiego z 1857 roku po raz pierwszy znalazł praktyczne zastosowanie na linii kolejowej Paryż–Rouen. W 1862 roku wynalazek Baranowskiego został zaprezentowany na Wystawie Światowej w Londynie, dzięki czemu zaczęto go powszechnie używać także w Anglii.



Rys. 1. Urządzenie umożliwiające jazdę na berto firmy Webb and Thompson (po lewej) oraz berto (po prawej)

Źródło: National Railway Museum, Port Adelaide, South Australia.

Postęp techniczny wymusił na konstruktorach opracowanie nowego rodzaju sygnalizacji, to jest sygnalizacji świetlnej. Obrazy wyświetlane na semaforach zostały zunifikowane w 1959 roku przez Organizację Współpracy Kolei (OSŽD). Jest to organizacja założona przez państwa Bloku Wschodniego. Dzięki temu w krajach, które były za żelazną kurtyną, systemy sygnalizacji, poza nielicznymi, drobnymi szczegółami, są do siebie bardzo zbliżone. W systemie sygnalizacji opracowanym przez OSŽD sygnały na sygnalizatorach świetlnych podawane są za pomocą świateł sygnałowych umieszczonych w pionowej linii. Obraz na semaforze może składać się z jednego bądź dwóch świateł, które dodatkowo mogą być uzupełnione pasem świetlnym znajdującym się pod komorami sygnałowymi. Pas świetlny tworzy sygnał tylko w połączeniu z dolnym światłem pomarańczowym semafora świetlnego.

Rosnący ruch transgraniczny w krajach Wspólnoty wymusił na Komisji Europejskiej podjęcie kroków, które ujednolicią różnorodne systemy napięcia w sieci trakcyjnej oraz systemy bezpieczeństwa sterowania ruchem kolejowym. Brak ujednolicenia znacznie utrudnia swobodę użytkowania tych samych pojazdów kolejowych w różnych krajach Wspólnoty Europejskiej. Dlatego Komisja Europejska zdecydowała o utworzeniu wspólnego Europejskiego Systemu Zarządzania Ruchem Kolejowym – ERTMS. ERTMS/ETCS jest Europejskim Systemem Sterowania oraz Globalnym

Systemem Kolejowej Radiokomunikacji Ruchomej (ERTMS/GSM-R). Maszynista, prowadząc pociąg w oparciu o ten system, nie bazuje już jedynie na własnym rozpoznaniu i interpretacji wskazań semaforów i wskaźników.

Podejście UE do problemu interoperacyjności – system ERTMS/ETCS

Różne systemy napięcia w sieci trakcyjnej i systemy bezpieczeństwa sterowania ruchem kolejowym znacznie utrudniają swobodę użytkowania tych samych pojazdów kolejowych w różnych krajach Wspólnoty Europejskiej. Jeszcze kilka lat temu pojazdy eksploatowane w międzynarodowym ruchu kolejowym podlegały szczegółowym obostrzeniom na stacjach granicznych i w wielu przypadkach musiały być wymieniane.

Przyczyną tego utrudnienia było niedostosowanie do wymagań bezpieczeństwa bądź systemu zasilania w danym kraju. W związku z tym już w grudniu 1989 roku grupa, w skład której wchodził ministrowie transportu państw członkowskich UE, uchwalili plan europejskiej kolei dużych prędkości. Miał on na celu zmniejszenie kosztów i skrócenie czasu przejazdu, w szczególności na odcinkach granicznych. W kolejnych latach trwały intensywne prace nad wdrożeniem wspólnego europejskiego systemu bezpieczeństwa. Dzięki temu została przyjęta rezolucja w sprawie Dyrektywy Rady z dnia 29 lipca 1991 r. w sprawie rozwoju kolei wspólnotowych (91/440/EWG). Dyrektywa ta nakazała stworzenie szeregu wymogów dotyczących interoperacyjności transportu kolejowego.

Jest to niezwykle istotne, ponieważ dzięki temu maszynista jest znacznie wcześniej informowany o sytuacji ruchowej panującej na danym szlaku. Może dzięki temu odpowiednio wcześniej zmniejszyć prędkość, stosując hamowanie rekuperacyjne. Przynosi ono korzyści w postaci mniejszego zużycia taboru kolejowego (silniki trakcyjne, zestawy kołowe, wkładki hamulcowe oraz elementy cięgłowo-zderzne), a także odzysk energii elektrycznej i oddanie jej do sieci trakcyjnej. Maszynista, prowadząc pociąg w oparciu o system ETCS nie bazuje już jedynie na własnym rozpoznaniu i interpretacji wskazań semaforów i wskaźników. Upraszcza to dostosowanie prędkości pojazdu do warunków ruchowych, a co najważniejsze, dzięki stałej kontroli systemu ewentualny błąd ludzki jest ograniczony do minimum. Gdy prędkość pociągu jest zbyt duża, wyliczona krzywa hamowania (uwzględniająca profil linii, długość pociągu, jego masę oraz rzeczywisty procent hamujący) może nie zostać zachowana, system ostrzega maszynistę, jeżeli ten nie reaguje, wdrożone zostaje hamowanie.

Kolejnym atutem ETCS jest to, że z tym systemem zgodnie z obowiązującym w Polsce prawem, dopuszczalne jest prowadzenie pociągu przy pojedynczej obsadzie drużyny trakcyjnej z prędkością powyżej 130 km/h, także prowadzenie ruchu kolejowego z prędkością powyżej 160 km/h. Kompleksowo wdrożony system ERTMS/ETCS nie tylko wspomaga pracę maszynisty, lecz również ją nadzoruje.

ETCS L1 FS (ETCS poziomu pierwszego o pełnym nadzorze) jest elementarną bazą do rozbudowy urządzeń znajdujących się na pojeździe oraz urządzeń powiązanych z infrastrukturą kolejową. Jest wykorzystywany na liniach z konwencjonalną sygnalizacją świetlną bądź kształtową.

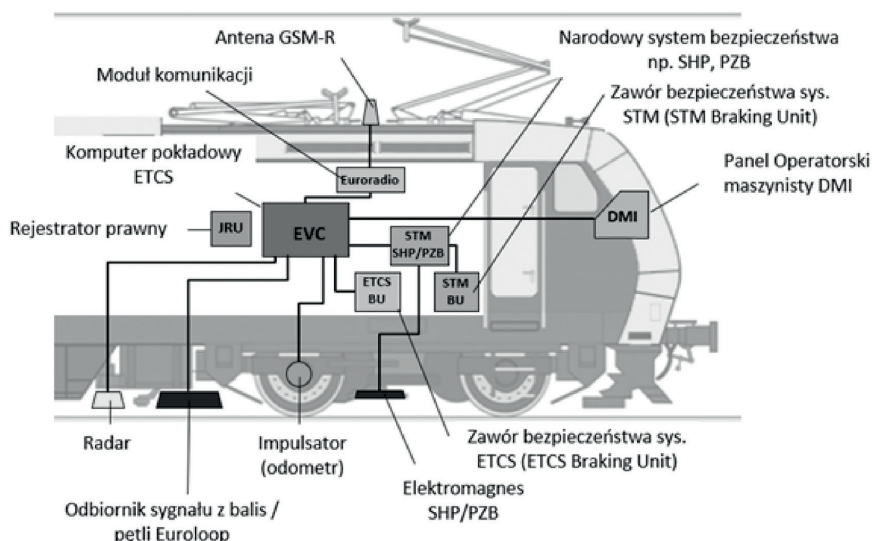
Poziom pierwszy ETCS stanowi uzupełnienie już istniejących urządzeń SRK oraz ściśle z nimi współgra, zapewniając, że pociąg nie przekroczy miejsca końca pozwolenia na jazdę. Dodatkowo kontrolowana jest jego maksymalna prędkość na poszczególnych odcinkach linii kolejowej oraz kierunek jazdy. Informacje pomiędzy punktem infrastruktury ETCS (tj. semafor, sygnalizator, wskaźnik) a urządzeniami pokładowymi znajdującymi się na pojeździe kolejowym są przesyłane punkt po punkcie. Odbywa się to dzięki balisom, które mogą być wykonane jako przełączalne (na przykład powiązane z aktualnymi wskazaniem semaforów) oraz nieprzełączalne (na przykład przekazujące stałą wartość ograniczenia prędkości bądź zapowiadające zmianę obowiązującego systemu bezpieczeństwa). Balisy przełączalne powiązane są z istniejącymi urządzeniami SRK. Sygnał z tych urządzeń trafia do dekodera LEU (ang. *Lineside Electronic Unit*), następnie odpowiednio obrobiony sygnał trafia do balisy przełączalnej i/lub europętli. Na podstawie wszystkich zebranych informacji pokładowy komputer ETCS wydaje zezwolenie do jazdy.

Pokładowy system ETCS poziomu pierwszego składa się z komputera pokładowego EVC (ang. *European Vital Computer*), interfejsu maszynisty DMI (ang. *Driver Machine Interface*), rejestratora prawnego JRU (ang. *Juridical Recording Unit*), układu mierzącego prędkość i przebytą drogę oraz anteny, której zadaniem jest odbiór danych z eurobalis. Pojazd kolejowy może być dodatkowo wyposażony w urządzenia do odczytu informacji z europętli, a także w urządzenia łączności cyfrowej GSM-R i moduły STM (ang. *Specific Transmission Module*). Moduły STM odbierają informacje z urządzeń przytorowych „narodowych” systemów bezpieczeństwa, które nie są kompatybilne z systemem ERTMS/ETCS, takich jak polski SHP, niemieckie PZB/LZB, czeski Mirel itd.

ETCS L1 LS (ETCS poziomu pierwszego o ograniczonym nadzorze) w przeciwieństwie do poziomu pierwszego FS dopuszcza wprowadzenie do systemu tylko wybranych sygnałów. Pozwala to na dostosowanie instalacji sprzętu tylko tam, gdzie jest to niezbędne, jednocześnie znacznie ogranicza koszty wdrożenia ETCS L1 LS. Ze względu na to, że kontrola systemu nie jest zapewniona przy każdym sygnale, maszynista jest zobowiązany prowadzić pociąg na podstawie wskazań semaforów i wskaźników, przez co poziom bezpieczeństwa nie jest tak wysoki jak w przypadku pełnego nadzoru.

ETCS L2 (ETCS poziomu drugiego) zawiera wszystkie funkcje poziomu pierwszego i podobnie jak poprzednik działa na podstawie istniejących urządzeń SRK. Przepływ informacji infrastruktura–pojazd nie odbywa się jedynie w oparciu o balisy, ale o ciągłą cyfrową transmisję radiową GSM-R, która jest realizowana przez RBC (ang. *Radio Block Centre*). Dlatego pojazd, jak i urządzenia infrastruktury przy-

torowej muszą zostać dodatkowo wyposażone w urządzenia obsługujące cyfrową łączność w systemie GSM-R spełniające normy TSI. Normy te określają wymagania co do standardu wymiany danych pomiędzy urządzeniami.



Rys. 2. Wyposażenie pojazdu przystosowanego do systemu ETCS L1 i L2

Źródło: opracowanie własne.

Wymagania TSI są niezwykle istotne, ponieważ zapewniają interoperacyjność systemu, a tym samym umożliwiają wykorzystanie tych samych pojazdów na terenie różnych krajów użytkujących system ETCS. Balisy nieprzełączalne w systemie ETCS poziomu drugiego wykorzystywane są jedynie do sprawdzenia i kalibracji pozycji pociągu względem linii kolejowej, zdefiniowania jego kierunku jazdy oraz zweryfikowania poprawności pomiaru drogi przez odometr.

Dane pociągowe wprowadzone przez maszynistę do systemu (numer maszynisty, numer pociągu, jego długość, masa, nastawa hamulca, rzeczywisty procent hamujący, prędkość maksymalna, opcjonalnie nacisk na oś) zostają wstępnie przetworzone przez komputer pokładowy EVC, a następnie, za pośrednictwem ustandaryzowanego interfejsu MT2, trafiają do euroradia, a stąd dzięki łączności cyfrowej przesyłane są do RBC. Do transmisji danych pomiędzy RBC a pojazdem wykorzystywany jest protokół ISDN-S2m. Centrum sterowania radiowego RBC jest jednostką komputerową, zainstalowaną w budynku nastawni, która gromadzi informacje z urządzeń SRK oraz pojazdów włączonych do systemu. Po analizie danych przesyła w sposób ciągły odpowiednie komunikaty do urządzeń pokładowych pojazdów za pośrednictwem sieci GSM-R.

Głównymi zadaniami centrum sterowania radiowego są: zbieranie informacji z USRK, dwukierunkowa ciągła transmisja GSM-R z pojazdami, nadanie polecenia

awaryjnego zatrzymania pociągu, przekazywanie mapy drogi wraz z ograniczeniami prędkości oraz obowiązującymi wskaźnikami i profilem linii, przekazywanie dodatkowych poleceń od dyżurnego ruchu, rejestracja zdarzeń oraz wydanie pozwolenia na jazdę. Ramka danych zezwolenia z RBC zawiera: okres ważności zezwolenia, maksymalną prędkość końcowego odcinka zezwolenia na jazdę, identyfikator balis, do których jest ważne zezwolenie, inne informacje związane z infrastrukturą (dopuszczalne prędkości lub prowadzone prace torowe).

Ze wszystkich zebranych danych RBC tworzy dynamiczny model ruchu pojazdu. Jeżeli maszynista nie stosuje się do wskazań systemu prezentowanych na DMI, to system sam wdraża odpowiednie czynności, na przykład wdroży hamowanie bądź zależnie od typu pojazdu – samoczynnie poda sygnał baczność, opuści odbierak prądu, gdy zajdzie taka potrzeba. Dzięki temu poziom bezpieczeństwa jest znacznie wyższy w porównaniu do poziomu pierwszego.

282	0,522 62,023	70	70	12.540	ZSM WG, R1, RT, PP	03:55 ⁵	0 ⁷		619	G
				0.522/62.023 WĘGLINIEC ; pm		04:09	13 ⁵	X4EA	700	100
	60,640 60,530	90				TRE 641000				63
			90	61.501 R7, R307, RT, H, (L2)		04:23	10 ⁹		619	G
				Węgliniec Skp pzs		I	4 ⁵	X4EA	700	100
				59.616 4SS		04:27 ⁵	3 ⁵		619	63
				ZEBRZYDOWA ZSM BC,		I	8 ⁴	X4EA	700	100
				49.073 R7, RT, H, 4SS, (L2)		04:35 ⁹	7 ²		619	63
										G

Rys. 3. Oznaczenie szlaku z systemem ETCS poziomu drugiego w służbowym rozkładzie jazdy

Źródło: Wycinek służbowego rozkład jazdy dla pociągu 641000 z dnia 24 lutego 2023 roku.

ETCS poziomu trzeciego jest obecnie najbardziej zaawansowanym rozwiązaniem technologicznym, jeżeli chodzi o zautomatyzowanie sterowania ruchem kolejowym. Jednocześnie sprawia on wiele problemów już na etapie projektowania, spowodowanych ogromną ilością detali oraz szeroką różnorodnością w przepisach poszczególnych krajów.

Zadaniem tego systemu jest nadzorowanie stanu wszystkich urządzeń tam, gdzie zachodzi możliwość odłączenia się od składu pociągu. Warto podkreślić, że niedopuszczalny jest wjazd pojazdów na odcinek działający w oparciu o ETCS L3, które nie są przystosowane do tego poziomu. Poziom trzeci zawiera w sobie urządzenia, które znalazły zastosowanie w poziomie pierwszym oraz drugim. Podobnie jak poziom drugi ETCS L3 działa na bazie ciągłej transmisji radiowej z RBC, które w tym przypadku dodatkowo jest wyposażone w funkcję ruchomego odcinka blokowego.

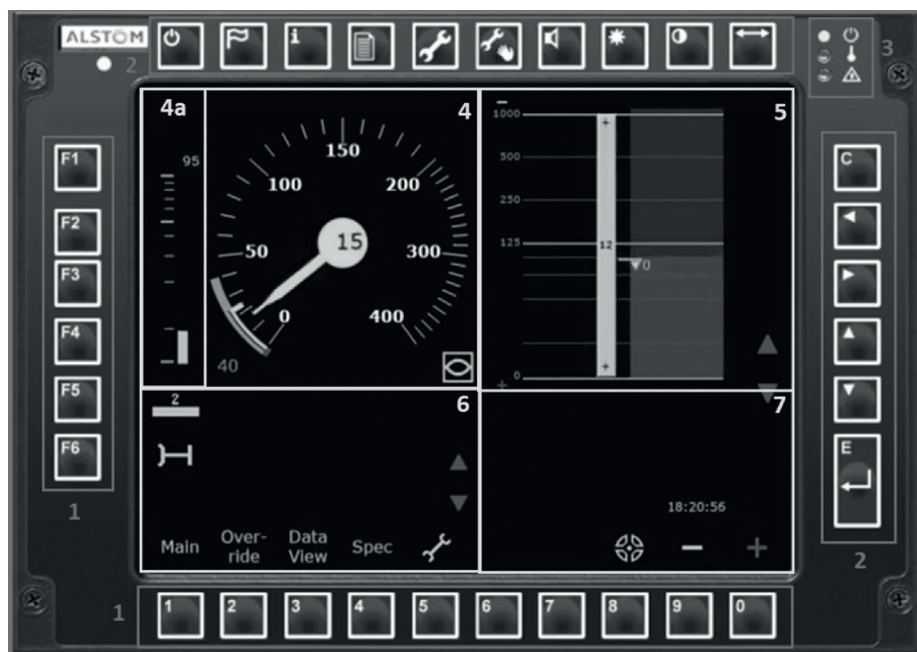
Dlatego niezbędnym wyposażeniem pojazdów jest moduł kontroli ciągłości składu TIU (ang. *Train Integrity Unit*). W przeciwieństwie do poprzedników poziom trzeci nie wymaga już zastosowania sygnalizatorów przytorowych ani tradycyjnych urządzeń SRK kontrolujących zajętość danego odcinka toru, ponieważ funkcja ta została przejęta przez RBC. Za sprawą ciągłej wymiany danych TIU–pojazd–RBC możliwe jest wyznaczenie ruchomych odstępów blokowych. Ruchome odcinki blokowe są tworzone na podstawie charakterystyki pozwolenia na jazdę pociągu poprzedzającego, jego prędkości, a także długości wolnego odcinka z uwzględnieniem mapy drogi, która zawiera profil linii. Końcem odcinka blokowego jest koniec pociągu poprzedzającego, dla zachowania bezpieczeństwa odległość ta jest zwiększona o najbardziej restryktywny model drogi hamowania następnego pociągu.

Największym problemem stojącym na drodze do powszechnego wdrożenia systemu ETCS poziomu trzeciego jest brak określonego systemu kontroli ciągłości składu oraz tego, jakie dodatkowe urządzenia muszą wchodzić w skład detekcji. Ponadto duży kłopot stanowi brak uwarunkowań prawnych, które byłyby w pełni akceptowalne przez wszystkie zarządy kolejowe. Niewątpliwie poziom trzeci charakteryzuje się największą przepustowością linii kolejowej, jednakże znacznie wyższe koszty na etapie projektowania oraz budowy wstrzymały prace dotyczące tego poziomu.

Prowadzenie pojazdu kolejowego pod nadzorem systemu ERTMS/ETCS

Informacje o statusie pracy systemu ETCS oraz polecenia wydawane prowadzącemu pojazd kolejowy są prezentowane na wyświetlaczu DMI (rys. 4). Maszynista za pomocą przycisków, których funkcje są zdefiniowane na stałe (ang. *Hardkeys*) (na rys. 4 oznaczone cyfrą 2) oraz których funkcje są określone programowo zgodnie z aktualnym obrazem na DMI (ang. *Softkeys*) (1), może wykonywać czynności operatorskie i wprowadzać wymagane dane pociągu. Za pośrednictwem panelu operatorskiego przekazywane są między innymi informacje na temat odległości od celu w postaci cyfrowej i analogowej jako wykres słupkowy. W trakcie jazdy pod nadzorem systemu ETCS DMI wyświetla odległość do celu (4a) tylko wtedy, gdy wymagane jest zmniejszenie prędkości. W obszarze prędkości (4) wyświetlana jest prędkość w formacie dziesiętnym i analogowym. Podczas wprowadzania danych przekazywane są w tym miejscu również informacje zwrotne z modułów STM – narodowych systemów bezpieczeństwa. W przypadku pociągów nadzorowanych przez ETCS DMI może wyświetlać różne właściwości trasy w obszarze podglądu (5). Prezentowane dane pochodzą z „mapy drogi” obliczonej dla danego pociągu oraz aktualnego stanu urządzeń SRK. Może to być na przykład informacja o zbliżaniu się do wskaźnika We8a – jazda bez pobierania prądu z sieci trakcyjnej. Zakres obszaru podglądu może być modyfikowany za pomocą klawiszy +/- w zakresie 500–32 000 m. Obszar informacyjny maszynisty (6) pokazuje poziom ETCS lub narodowy system pracy,

na przykład SHP, PZB. Dodatkowo w tym obszarze wyświetlane są informacje tekstowe, na przykład wskaźnik W6b – podać sygnał baczność. Obszar informacyjny (7) zawiera symbole informujące o statusie pojazdu oraz ewentualnych błędach, wyświetlany jest dodatkowo numer pociągu i aktualny czas.

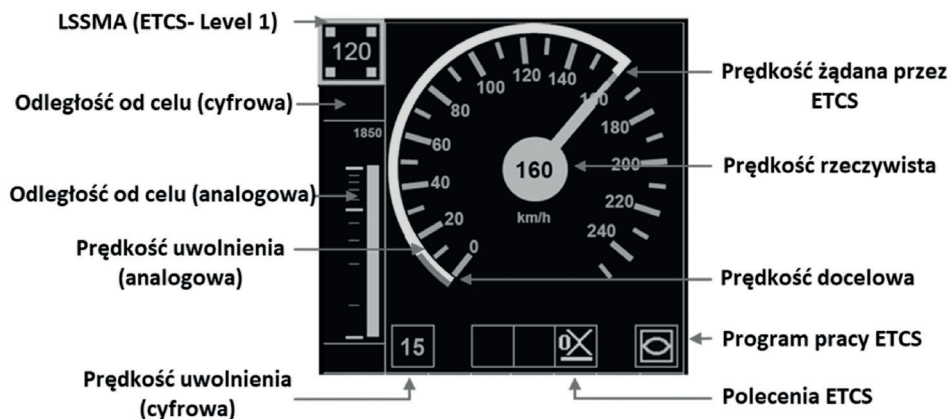


Rys. 4. Wyświetlacz DMI, 1 – Softkeys, 2 – Hardkeys, 3 – kontrolki statusu wyświetlacza, 4 – obszar pokazywania prędkości, 4a – odległość od celu, 5 – podgląd ETCS tzw. przedpole, 6 i 7 – dodatkowe informacje dla maszynisty

Źródło: opracowanie własne.

Obszar wyświetlania prędkości przekazuje maszyniście informacje o prędkości pociągu, polecenia systemu ETCS oraz program pracy systemu.

Odległość od celu jest odległością do miejsca, od którego obowiązuje niższa prędkość docelowa. Wartość ta jest wyświetlana na DMI w postaci cyfrowej i analogowej. Prędkość dopuszczalna dla danego odcinka jest obliczana przez komputer pokładowy na podstawie trasy i właściwości pojazdu oraz krzywych hamowania. Prędkość docelowa to żądana wartość prędkości obowiązującej od punktu celu. Prędkość docelowa równa 0 km/h jest równoznaczna z koniecznością zatrzymania pojazdu w określonym miejscu (semafor, przystanek). LSSMA jest najniższą kontrolowaną prędkością przez ETCS w trybie ograniczonego nadzoru LS. Prędkość ostrzegawcza zawiera się pomiędzy wartościami prędkości żądanej a prędkością wdrożenia hamowania przez system.



Rys. 5. Obszar wyświetlania prędkości

Źródło: opracowanie własne.

Każde żądanie zmiany prędkości jest sygnalizowane akustycznie przez system ETCS oraz za pomocą różnych kolorów na tarczy prędkościomierza, zależnych od aktualnej pozycji na obliczonej krzywej hamowania i podjętych działań przez system. Prędkość uwolnienia to ograniczenie prędkości, poniżej której pociąg może dojechać w pobliżu miejsca, gdzie kończy się pozwolenie na jazdę.

Tab. 1. Zestawienie komunikatów widocznych na DMI po zmianie prędkości docelowej

	Zmiana prędkości na wyższą Zmiana na wyższą prędkość nie jest zapowiadana. Kiedy następuje, zmienia się tylko prędkość dopuszczalna. Koło prędkościomierza jest ciemnoszare, natomiast wskaźnik prędkości rzeczywistej – jasnoszary.
	Zmiana prędkości na niższą Okolo 10 sekund przed rozpoczęciem docelowej krzywej hamowania DMI wskazuje nową prędkość docelową oraz odległość od miejsca obowiązywania tej prędkości. Odbyna się to za pomocą białego koloru na tarczy szybkościomierza, pomiędzy prędkością docelową a rzeczywistą. Dodatkowo zmiana ta sygnalizowana jest akustycznym sygnałem ostrzegawczym.

	Ogłoszenie punktu zadziałania hamulca Okolo czwartej sekundy przed rozpoczęciem docelowej krzywej hamowania ETCS sygnalizuje punkt rozpoczęcia hamowania. Kolor koła prędkościomierza oraz prędkości rzeczywistej zmienia się na żółty.
	Prędkość ostrzegawcza Jeśli prędkość rzeczywista przekroczy wartość prędkości żądanej przez system, ekran przełącza się w ten tryb i dodatkowo nadawany jest sygnał ostrzegawczy. DMI pokazuje różnicę między prędkością żądaną przez system a prędkością rzeczywistą pociągu na pomarańczowo. W miejscu, gdzie kończy się prędkość ostrzegawcza, znajduje się punkt wdrożenia hamowania przez ETCS.
	ETCS hamowanie wymuszone Gdy prędkość rzeczywista pociągu nie spadnie poniżej dolnej wartości prędkości ostrzegania, to aby zachować wymaganą krzywą hamowania, system wdraża hamowanie. Różnica między prędkością rzeczywistą i żądaną podświetlana jest na czerwono. Na liniach z ETCS poziomu drugiego, gdy tylko prędkość rzeczywista spadnie poniżej wartości prędkości żądanej, komputer usuwa hamowanie wymuszone.

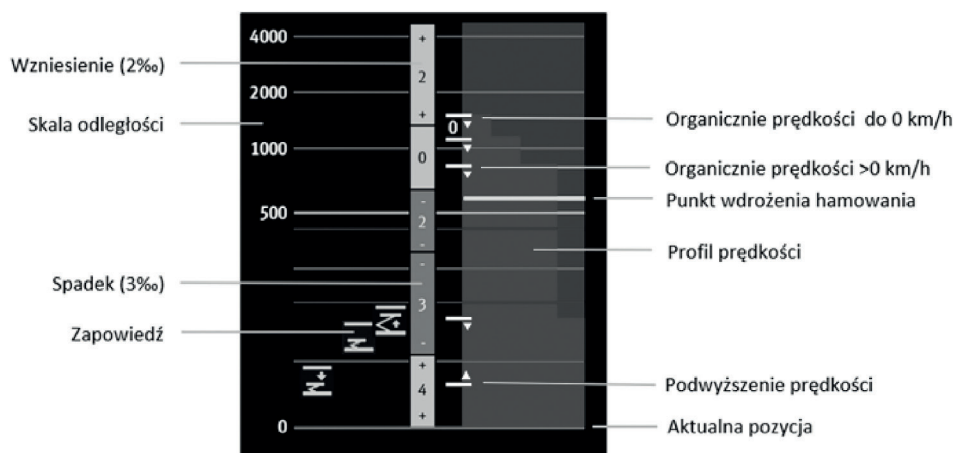
Źródło: opracowanie własne.

W obszarze podglądu system ETCS z wyprzedzeniem wyświetla informacje dotyczące danego odcinka linii kolejowej. Maszynista może zależnie od potrzeb sam dostosować skalę tego podglądu w zakresie od 500 m do 32 km.

Aktualna prędkość jest reprezentowana na wyświetlaczu za pomocą niebieskiego paska znajdującego się na całej szerokości pola. Zapowiedź zwiększenia prędkości nie powoduje żadnych zmian w szerokości paska, jedynie strzałka koloru szarego jest skierowana ku górze. Gdy zachodzi potrzeba zredukowania prędkości, system odpowiednio wcześniej powiadamia o tym maszynistę przez zmniejszenie szerokości paska, natomiast strzałka jest skierowana w tym przypadku ku dołowi. W przypadku gdy wymagane jest zmniejszenie prędkości do zera, co tożsame jest z końcem pozwolenia na jazdę EOA (ang. *End of Authority*), obok strzałki skierowanej ku dołowi widnieje cyfra 0.

Żółty pasek poprzeczny w obszarze podglądu obrazuje obliczony przez ETCS punkt wdrożenia hamowania – w odniesieniu do aktualnej prędkości oraz danych pociągu i profilu trasy. Gdy na trasie występuje więcej ograniczeń prędkości, wyświetlany

jest i tak tylko jeden punkt wdrożenia hamowania. Pionowy pasek znajdujący się na środku okna pokazuje współczynniki nachylenia toru: + oznaczający wzniesienie, – oznaczający spadek, wartości te są wyrażane w %.



Rys. 6. Obszar podglądu ETCS

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 2. Tryby pracy systemu ETCS

	IS – odłączenie (<i>Isolation</i>)	System jest wyłączony wyłącznikiem awaryjnym ETCS. Pojazd przechodzi do izolacji trybu pracy ETCS.
–	NP – brak zasilania (<i>No power</i>)	Wyłączenie ETCS za pomocą wyłącznika głównego.
	SF – uszkodzenie (<i>System Failure</i>)	W przypadku wystąpienia błędów związanych z bezpieczeństwem pracy systemu ETCS komputer pokładowy przechodzi w tryb pracy SF, jednocześnie inicjując hamowanie awaryjne.
–	SL – uśpienie (<i>Sleeping</i>)	W tym trybie pracy EVI odbiera informacje z trasy, ale nie realizuje funkcji nadzoru nad prowadzeniem pociągu, na przykład w przypadku podwójnej trakcji bądź push-pull.
	SB – czuwanie (<i>Stand By</i>)	Po uruchomieniu system przechodzi w tryb pracy SB.
	SH – tryb manewrowy (<i>Shunting</i>)	W trybie pracy SH system ETCS zezwala na maksymalną prędkość pojazdu 25 km/h. Pojazdy w programie SH mogą poruszać się w obu kierunkach i przejeżdżać obok sygnałów „Stój”. Tryb SH jest dostępny na poziomach ETCS 0, 1 i 2.

	FS – pełny nadzór (<i>Full Supervision</i>)	W tym trybie pracy jazda odbywa się zgodnie z poleceniami systemu ETCS wyświetlanymi na DMI w kabinie maszynisty. Komunikaty te otrzymywane są z Centrum Sterowania Radiowego (RBC), dotyczą na przykład maksymalnej prędkości i miejsca zatrzymania pociągu – „Miejsce Końca Zezwolenia na Jazdę” (EOA).
	UN – linia nieprzystosowana (<i>Unfitted</i>)	Linia kolejowa nie jest wyposażona w urządzenia oddziaływania ETCS. Komputer pokładowy ETCS zezwala na maksymalną prędkość 50 km/h. Tryb pracy UN jest możliwy tylko na poziomie 0.
	SR – odpowiedzialność personelu (<i>Staff Responsible</i>)	SR – tryb pracy urządzeń pokładowych systemu ETCS używany w przypadku wadliwego działania urządzeń SRK. Odpowiedzialność za jazdę w trybie SR spoczywa na maszyniście.
	OS – jazda na widoczność (<i>On Sight</i>)	W trybie pracy OS ETCS monitoruje maksymalną dopuszczalną prędkość, tj. 20 km/h, oraz miejsce EOA. Jazda odbywa się na zasadach jazdy na widoczność.
	TR – zatrzymanie przez ETCS (<i>Trip</i>)	Do wdrożenia hamowania przez system ETC dochodzi w przypadku przejechania miejsca EOA. Zmiana poziomu ETCS bez MA, błędu podczas odczytu danych z balis, braku balisy bądź oddziaływania narodowych systemów bezpieczeństwa pracujących w tle.
	PT – po zatrzymaniu przez ETCS (<i>Post trip</i>)	ETCS przełącza się na tryb pracy PT i anuluje hamowanie wymuszone. Następuje to po zgodzie dyżurnego ruchu na kontynuację jazdy i potwierdzeniu trybu pracy TR po zatrzymaniu pociągu.
	NL – podrzędny (<i>Non leading</i>)	Warunkiem koniecznym przejścia na tryb pracy NL jest to, aby kabina maszynisty lub – w przypadku pojazdów z dwiema kabinami maszynisty – zawory hamulca maszynisty w obu kabinach maszynisty były w położeniu „odcięcia”. Ma to miejsce na przykład podczas popychu pociągu bądź trakcji podwójnej.
	SN – STM krajowy (<i>STM National</i>)	Komputer pokładowy ETCS pozostawia monitorowanie pociągu krajowemu systemowi bezpieczeństwa, na przykład PZB/LZB, SHP, Mirel.
	RV – cofanie pociągu (<i>Reversing</i>)	W trybie RV system ETCS umożliwia maszyniście zmianę kierunku jazdy pociągu z tej samej kabiny.

Źródło: opracowanie własne.

Prowadzenie lokomotywy z oszczędzaniem energii elektrycznej

W dzisiejszych czasach, kiedy ceny energii osiągnęły najwyższy od wielu lat poziom, każdy nie tylko w życiu codziennym, ale w niemal wszystkich sferach życia świadomie podchodzi do zużycia energii. Dostępnych mamy wiele sposobów na oszczędzanie energii elektrycznej w naszych domach, ponieważ jest to bezpośrednio związane z kosztami, które sami ponosimy. Nie należy przy tym zapominać o kosztach, które ponosi nasza planeta, czyli o emisji CO₂ do atmosfery, a także eksploracji złóż paliw kopalnych, co wpływa degradująco na cały ekosystem. Świadome zużycie energii obejmuje zarówno właściwe jej wykorzystanie podczas prac domowych czy recykling surowców wtórnych, jak i prawidłowe, świadome ogrzewanie. Według szacunków zmniejszenie temperatury o jeden stopień pozwala zredukować zużycie energii o około 6%.

Czy prowadząc pojazd w sposób ekonomiczny, można zaoszczędzić energię i zredukować emisję CO₂? W 2020 roku transport w Polsce był odpowiedzialny za 20,9% emisji dwutlenku węgla do atmosfery (*Emisja dwutlenku węgla (CO₂), 2022*). Przyczynia się do tego między innymi wielokrotne hamowanie i częsta zmiana biegów. Rozważna, przewidująca jazda ze zmniejszoną prędkością jest bardziej przyjazna dla klimatu i pozwala zmniejszyć ślad węglowy nawet o 370 kg CO₂ na każde przejechane 100 km (Heimann, 2022). Na dystansie 10 000 km przy założeniu, że zużycie paliwa oscyluje na poziomie 8 litrów na 100 km, stosując zasady ekonomicznej jazdy, można zaoszczędzić około 160 litrów benzyny, co w przybliżeniu daje kwotę 1100 zł.

Jazda ekonomiczna ma ogromne korzyści nie tylko w transporcie drogowym, ale również w transporcie kolejowym. W 2021 roku DB Cargo w Niemczech zużyło około 1500 GWh energii trakcyjnej (*Deutsche Bahn. Daten&Fakten 2022, 2022*). Ze względu na stale rosnącą liczbę lokomotyw z silnikami asynchronicznymi, umożliwiającymi hamowanie rekuperacyjne, energia odzyskana podczas hamowania wyniosła około 11,4%.

Za każdą zakupioną kilowatogodzinę DB Cargo musiało zapłacić 12 centów w wysokiej taryfie (06:00–22:00) oraz 11 centów w taryfie niskiej (22:00–06:00). Każda oddana kilowatogodzina pochodząca z hamowania rekuperacyjnego przekłada się na zwrot około 10 centów w wysokiej i odpowiednio 9 centów w taryfie niskiej.

Pojazdy trakcyjne wykorzystują energię do oświetlenia wewnętrznego i zewnętrznego, ogrzewania i klimatyzacji, zasilania osprzętu, takiego jak jednostki sterujące, przetwornice, wentylatory silników trakcyjnych, sprężarki powietrza, a przede wszystkim do zasilania silników trakcyjnych, które wprowadzają pojazd w ruch. Aby pojazd mógł ruszyć z miejsca, musi pokonać opory ruchu, w skład których wchodzi:

- opory biegu, których źródłem są opory tarcia w strefie kontaktu kół z szynami, opory tarcia w mechanizmach przenoszenia napędu, opory powietrza,

- opory nachylenia, równe składowej siły ciężkości pojazdu,
- opory łuku wynikające ze zwiększonych oporów tarcia obrzeży kół o szyny,
- opory bezwładności (dynamiczne).

Opór powietrza rośnie wraz z kwadratem prędkości i staje się decydującą siłą oporu od około 60 km/h. Podwojenie prędkości jazdy prowadzi do czterokrotnego wzrostu oporu powietrza i potrojenia zużycia energii. Zasadniczo zużycie energii przez pociąg zależne jest od:

- aktualnej sytuacji ruchowej,
- stylu jazdy,
- rozkładu jazdy,
- profilu linii kolejowej,
- oddziaływania pogody,
- urządzeń pomocniczych pojazdu oraz jego typu.

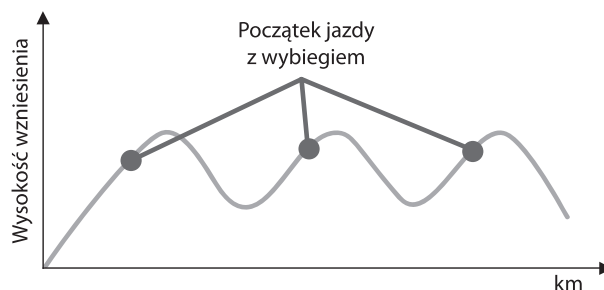


Rys. 7. Porównanie stylów jazdy mających wpływ na zużycie energii

Źródło: Krause, Zimmermann, 2015.

Aby zmniejszyć zapotrzebowanie pojazdu trakcyjnego na energię podczas jazdy, powinno się stosować do poniższych zaleceń:

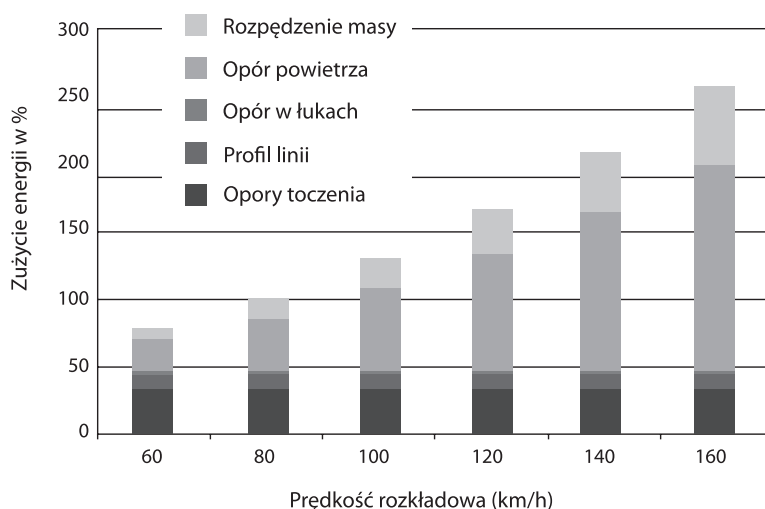
- stosować dynamiczny rozruch aż do osiągnięcia prędkości wymaganej, aby utrzymywać rozkładowy czas jazdy (mniejszej od prędkości rozkładowej), oszczędność energii ze względu na mniejszy opór powietrza,
- jechać z możliwie stałą siłą pociągową lub hamującą, co pozwala uniknąć strat przełączeniowych w falownikach trakcyjnych,
- wybierać, o ile jest to możliwe dla danej serii pojazdu, automatyczne wyłączanie silników trakcyjnych/wózków do zadanej siły pociągowej,
- stosować długą jazdę z wybiegiem przed spodziewanym hamowaniem (wykorzystanie energii kinetycznej pociągu),
- używać hamowania elektrodynamicznego do odzysku energii,
- wykorzystywać profil linii kolejowej, na przykład wykorzystanie grawitacji na zjeździe ze wzniesienia.



Rys. 8. Przykład właściwego operowania siłą pociągową w terenie górzystym

Źródło: Krause, Zimmermann, 2015.

Wyższe prędkości prowadzą do nieproporcjonalnie wysokiego wzrostu zużycia energii. Wzrost prędkości o 12% skutkuje zwiększeniem zużycia energii o około 20%.



Rys. 9. Zużycie energii w funkcji prędkości

Źródło: Ilgmann, 1998.

Rozkład jazdy pociągów jest elementarnym ogniwem sprawnej organizacji pracy przewozowej na kolei. To według niego odbywa się ruch wszystkich pociągów kursujących po infrastrukturze kolejowej. Rozkład jazdy opracowywany jest na podstawie graficznych wykresów ruchu. Tworzenie wykresów to podstawowe zadanie inżynierii ruchu. Rozkład uwzględnia maksymalne prędkości pojazdów oraz ograniczenia prędkości znajdujące się na infrastrukturze kolejowej, dodatkowo musi zapewnić dotrzymanie czasów jazdy przez pociąg oraz płynność ruchu i bezpieczeństwo. Podczas tworzenia rozkładu jazdy konstruktorzy zawsze przyjmują pewien bufor w czasach przejazdu pociągu w zależności od jego rodzaju. Patrząc na odcinek stukilometrowy,

są to: dla pociągów ekspresowych 2,5 minuty, pasażerskich – od 3 do 5 minut, towarowych – 7 minut, lokomotyw luzem – 3 minuty.

Prędkość rozkładowa 64,300 63,240 90	73.400 R2, RT, H, 4SS LEGNICA : pt	05:35	0 ⁸						
		05:44	9	X4EA	700	100			
						63			
		05:49	6 ⁸						
90	65.113 R2, R307, RT, H, PP Wielkie Piekary podg ZSM WMu, 61.298 R2, RT, H, 4SS, L2 Szczedrzykowice podg, po ZS WMu, 52.223 R2, RT, H, 4SS, L2 MALCZYCE ZSM WMu, 42.706 R2, RT, H, 4SS, L2 Środa Śląska PGL podg, b ZSM WMu, 33.344 R2, RT, H, 4SS, L2 Miękinia ZSM WMu, 24.433 R2, RT, H, 4SS, L2 Wrocław Leśnica ZSM WMu, 13.577 R2, RT, H, PP, L2	05:54	3 ⁸						
		06:01	6 ²						
		06:08	6 ⁵						
		06:15	6 ⁴						
		06:22	6 ¹						
		06:30	7 ⁴						

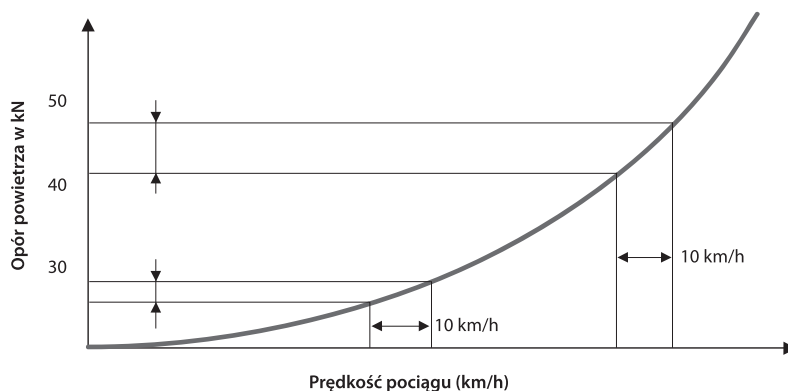
Rys. 10. Prędkości i czasy przejazdu ujęte w służbowym rozkładzie jazdy

Źródło: wycinek ze służbowego rozkładu jazdy dla pociągu 641000 z dnia 24 lutego 2023 roku.

Jak widać na wycinku ze służbowego rozkładu jazdy (rys. 10), występują znaczne różnice w czasie przejazdu skróconym i wydłużonym. Aby zachować podane czasy przejazdu, obliczone prędkości wynoszą odpowiednio:

- Wielkie Piekary–Szczedrzykowice: prędkość przy skróconym czasie przejazdu 87,8 km/h, prędkość przy wydłużonym czasie przejazdu 77,7 km/h,
- Szczedrzykowice–Malczyce: prędkość przy skróconym czasie przejazdu 87,8 km/h, prędkość przy wydłużonym czasie przejazdu 81,5 km/h,
- Malczyce–Środa Śląska: prędkość przy skróconym czasie przejazdu 87,8 km/h, prędkość przy wydłużonym czasie przejazdu 80,2 km/h,
- Środa Śląska–Miękinia: prędkość przy skróconym czasie przejazdu 87,6 km/h, prędkość przy wydłużonym czasie przejazdu 76,3 km/h,
- Miękinia–Wrocław Leśnica: prędkość przy skróconym czasie przejazdu 88 km/h, prędkość przy wydłużonym czasie przejazdu 81,4 km/h.

Aby zachować rozkładowy czas przejazdu pociągu, wynoszący 36 minut na całym rozpatrywanym odcinku, czyli od Wielkich Piekarów do Wrocławia Leśnica, należy utrzymywać prędkość 79,5 km/h. Na tym odcinku obowiązuje prędkość rozkładowa wynosząca 90 km/h, różnica wynosi więc 10,5 km/h. Zredukowanie prędkości pociągu zmniejszy opór powietrza, co spowoduje spadek ilości pobranej energii.



Rys. 11. Opór powietrza w funkcji prędkości

Źródło: Ilgmann, 1998.

Badania własne i wnioski

Postanowiono sprawdzić, czy wdrożenie zasad ekonomicznego stylu prowadzenia pociągu w praktyce przyniesie wymierne efekty w postaci oszczędności energii. W tym celu jako obiekt badań wybrano pociąg o numerze 660005 relacji Zakłady Koksownicze Zdzeszowice–Ziltendorf EKO w Niemczech. Pociąg ten został wytypowany do pracy badawczej ze względu na jego stałe parametry, takie jak brutto pociągu, ten sam rodzaj wagonów oraz typ lokomotywy. Rozpatrywane pociągi są prowadzone wielosystemową lokomotywą Vectron produkcji firmy Siemens. W składzie pociągu znajduje się 20 wagonów platform typu Sgmrss 90'. Są to sześciokołowe, przegubowe wagony 90' przystosowane do przewozu kontenerów. Umożliwiają one transportowanie dużych kontenerów o długości: 20', 30', 40' i 45', a także wymiennych pojemników samochodowych. Na wagonach tego typu zostało umieszczonych 40 kontenerów Innofreight C45 Woodtainer XXL załadowanych koksem odlewniczym, wykorzystywanym na potrzeby procesu produkcyjnego w hucie żelaza EKO Stahl ArcelorMittal w Eisenhüttenstadt. Kontener XXL C45 ma wysokość równą 2,9 m, szerokość 2,9 m oraz długość 6,05 m, próżny kontener waży 2,9 t. Łączna długość każdego pociągu wraz z lokomotywą wynosiła 609 m, masa brutto 2797 (+/-) 10 t, natomiast prędkość maksymalna 90 km/h. W celu osiągnięcia miarodajnych wyników dokonano dziesięciu prób przejazdu na odcinku Zakłady Koksownicze Zdzeszowice–Legnica (232 km).



Rys. 12. Lokomotywa Siemens Vectron z wagonami Innofreight C45 Woodtainer XXL na stacji w Węglińcu

Źródło: ze zbiorów autora.

Pięć przejazdów polegało na niestosowaniu zasad racjonalnego gospodarowania energią, natomiast podczas kolejnych pięciu przejazdów wcześniej opisane zasady ekonomicznej jazdy były ściśle przestrzegane. Warunki pogodowe oraz sytuacja ruchowa dla każdej z prób były porównywalne. W tabelach 3 i 4 przedstawiono odczyt zużycia energii z fabrycznego urządzenia pomiarowego znajdującego się na lokomotywie. Pomiar zużycia energii został dokonany za wyłącznikiem szybkim, a więc zostało zmierzone całkowite zużycie energii wykorzystanej przez pojazd, a nie jedynie energii wykorzystanej do napędu.

Tab. 3. Zużycie energii trakcyjnej bez stosowania zasad ekonomicznej jazdy

Próba	1	2	3	4	5
Zużycie energii (kWh)	4091	4064	4078	4165	4087

Źródło: opracowanie własne.

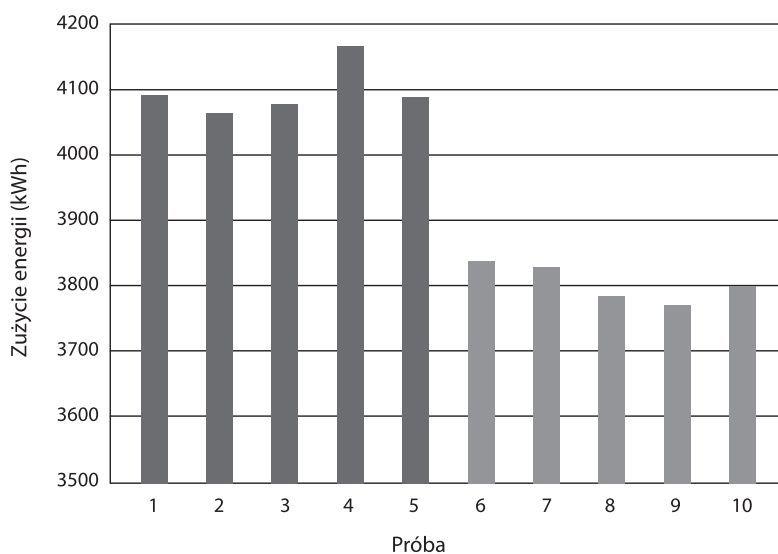
Podczas przejazdów nie stosowano zasad oszczędnej jazdy. Starano się wydłużyć rozpędzenie do prędkości rozkładowej oraz utrzymywać maksymalną prędkość dozwoloną na danym odcinku. Gdy zachodziła konieczność regulacji prędkości jazdy bądź też konieczność całkowitego zatrzymania pociągu, hamowanie było wdrażane najpóźniej, jak to możliwe, bez użycia hamulca elektrodynamicznego z odzyskiem energii. Wykorzystywany był jedynie pneumatyczny hamulec zespolony. Średnie zużycie energii na odcinku 232 km wyniosło 4097 kWh.

Tab. 4. Zużycie energii trakcyjnej z zastosowaniem zasad oszczędnej jazdy

Próba	6	7	8	9	10
Zużycie energii (kWh)	3837	3829	3785	3771	3802

Źródło: opracowanie własne.

Dane w tabeli 4 pokazują zużycie energii elektrycznej pobranej przez pociąg prowadzony z zastosowaniem zasad oszczędnego gospodarowania energią. Na całym odcinku prędkość pociągu została zredukowana z 90 km/h do 80 km/h – z wyjątkiem sytuacji, w której pociąg grawitacyjnie przyspieszył do prędkości 90 km/h. Dokonywano dynamicznych rozruchów pociągów do dopuszczalnej prędkości, bez utraty przyczepności przez zestawy kołowe. Podczas prowadzenia pociągów wykorzystywano topografię terenu i tuż przed szczytem wzniesienia wyłączano siłę pociągową. Do regulacji prędkości używano jedynie hamulca elektrodynamicznego z odzyskiem energii. Gdy siła hamująca generowana przez hamulec była niewystarczająca, wdrażano wedle potrzeby kolejne stopnie hamowania służbowego za pomocą hamulca zespólnego. Dodatkowo starano się jednocześnie utrzymać możliwie największą siłę hamulca elektrodynamicznego przez jak najdłuższy czas. Średnie zużycie energii na rozpatrywanym odcinku z wykorzystaniem zasad jazdy ekonomicznej wyniosło 3805 kWh, czyli średnio 292 kWh mniej.



Rys. 13. Zużycie energii podczas przejazdów doświadczalnych

Źródło: opracowanie własne.

Podczas prowadzenia pociągu notorycznie zdarzają się sytuacje, w których wymagane jest dodatkowe zatrzymanie przed semaforem wskazującym sygnał „Stój”. Jest to spowodowane sytuacją ruchową, zbyt późnym zamknięciem przejazdu przez dróżnika, niedopatrzaniem dyżurnych ruchu bądź usterkami SRK. Każde ponadplanowe zatrzymanie pociągu i jego późniejszy rozruch generuje dodatkowe zużycie energii, którego często można uniknąć.



Rys. 14. Lokomotywa EuroSprinter ES64F z wagonami typu Habbiins na stacji w Ruhland (Niemcy)

Źródło: ze zbiorów autora.

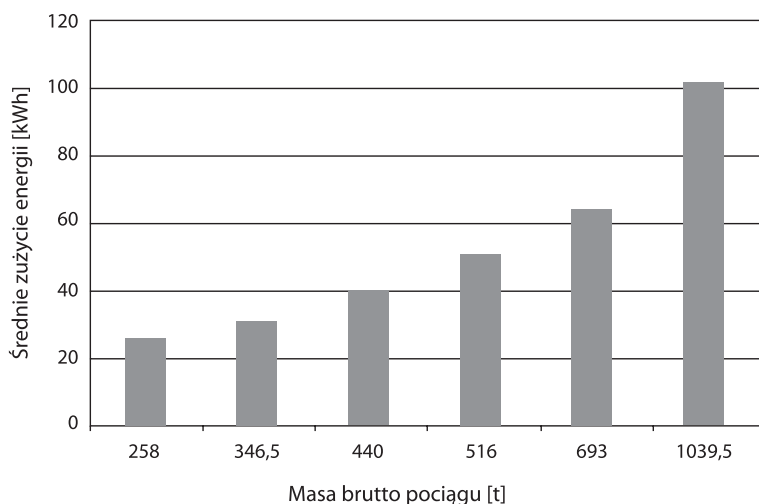
Postanowiono zbadać doświadczalnie, ile energii jest niezbędne do rozpędzenia pociągu do prędkości rozkładowej 90 km/h. Ze względu na stały typ wagonów znajdujących się w składzie pociągu oraz zmienne brutto jako obiekt badań został wybrany pociąg o numerze 661019 relacji Kąty Wrocławskie–Braunschweig w Niemczech. Pociągi te są prowadzone lokomotywą EuroSprinter ES64F, w składzie pociągu zawsze znajdują się wagony tylko jednego typu, tj. Habbiins – są to kryte wagony z przesuwными ścianami, o wysokości 2,8 m i długości 23,27 m. Różne typy wagonów wykorzystane w czasie dokonywania prób mogłyby dać fałszywy wynik ze względu na odmienne opory powietrza oraz opory toczenia. Podczas każdego z przejazdów dokonywano zatrzymania zawsze w tych samych punktach, po dwa zatrzymania na każdą z przeprowadzonych prób. Wyniki z przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Dane z dokonanych prób – rozpędzenie pociągów od 0 do prędkości rozkładowej 90 km/h

Nr próby	1		2		3		4		5		6	
Masa brutto (t)	338		436,5		530		606		783		1129,5	
Długość (m)	90		113		252		180		226		339	
Liczba wagonów	3		4		10		6		8		12	
Zużyta energia (kWh)	25	27	30	33	42	39	49	53	67	62	101	102
Średnie zużycie energii (kWh)	26		31,5		40,5		51		64,5		101,5	

Źródło: opracowanie własne.

Jak można zauważyć w zaprezentowanych wynikach pomiaru, istnieje pewna zbliżona prawidłowość stosunku pobranej energii niezbędnej do rozpędzenia pociągu do masy pociągu. Dla pociągu o masie 338 t zużycie energii wyniosło średnio 26 kWh, co daje współczynnik kWh/t na poziomie 0,076. Dla pozostałych pociągów współczynniki wynoszą odpowiednio 0,072; 0,076; 0,084; 0,082; 0,089. Powyższe wartości pozwalają określić średni współczynnik zużycia energii niezbędnej do rozpędzenia pociągu od 0 do prędkości 90 km/h wynoszący około 0,08 kWh na każdą przewożoną tonę.



Rys. 15. Średnie zużycie energii niezbędnej do rozpędzenia pociągu od 0 do prędkości 90 km/h

Źródło: opracowanie własne.

Systemy sterowania ruchem kolejowym i rodzaje urządzeń sygnalizacyjnych znacząco wpływają na zużycie energii przez pojazd trakcyjny. Jeżeli maszynista zostanie wcześniej poinformowany o konieczności zmniejszenia prędkości, może wykorzystać do regulacji prędkości hamowanie z odzyskiem energii na znacznie dłuższym odcinku drogi. W przypadku, gdy zostaje o tym powiadomiony później, sama siła hamulca elektrodynamicznego może okazać się niewystarczająca do zmniejszenia prędkości i niezbędne jest użycie pneumatycznego hamulca zespolonego, co ma ogromny wpływ na zużycie zestawów kołowych oraz wkładek hamulcowych w taborze kolejowym.

Postanowiono zbadać wpływ hamowania rekuperacyjnego na ilość oddanej energii oraz długość drogi hamowania. W tym celu jako obiekt badań ponownie wybrano pociąg o numerze 660005 relacji Zakłady Koksownicze Zdzeszowice–Ziltendorf EKO w Niemczech. Podczas trzech przejazdów w tym samym miejscu dokonano sprawdzenia ilości energii oddanej do sieci trakcyjnej oraz długości drogi niezbędnej do zmniejszenia prędkości z 90 do 20 km/h. W tabeli 6 zaprezentowano średnią zmierzonych wartości z trzech prób dla siły hamowania wynoszącej 100 kN.

Tab. 6. Wpływ hamowania rekuperacyjnego na ilość odzyskanej energii

Prędkość początkowa (km/h)	Prędkość końcowa (km/h)	Średnia ilość odzyskanej energii (kWh)	Średnia odległość niezbędna do zmniejszenia prędkości (m)
90	80	45	1650
80	70	39	1600
70	60	34	1450
60	50	27	1050
50	40	23	1000
40	30	20	650
30	20	11	600
Łącznie		299	8000

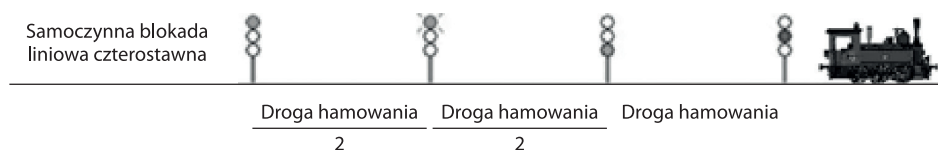
Źródło: opracowanie własne.

Jak pokazują dane z tabeli 6, aby zredukować prędkość pociągu o masie 2797 t z 90 km/h do 20 km/h, wykorzystując jedynie hamowanie elektrodynamiczne z siłą 100 kN, niezbędna odległość to aż 8 km. Średnia ilość oddanej energii wyniosła 299 kWh. Pomimo dobrych warunków atmosferycznych zrezygnowano z wdrożenia większej siły hamującej, gdyż powodowała ona utratę przyczepności, a tym samym zadziałanie urządzeń antypoślizgowych. W rezultacie mogłoby to znacząco zniekształcić wynik prowadzonych badań. To badanie podkreśla, jak ważne jest wcześniejsze informowanie maszynisty o konieczności zmiany prędkości. Dzięki tej wiedzy można tak regulować prędkość, aby nie tylko zmniejszyć pobór energii, ale też jak najwięcej oddać jej do sieci.

W zależności od maksymalnej prędkości drogowej obowiązującej na liniach kolejowych stosuje się następujące długości drogi hamowania: 400, 500, 700, 1000 i 1300 m. Od tych wartości zależna jest odległość ustawiania tarcz ostrzegawczych, semaforów i wskaźników.

Zgodnie z Instrukcją PKP PLK o prowadzeniu ruchu pociągów Ir-1 przyjęto następujące zasady dotyczące odległości pomiędzy sygnalizatorami:

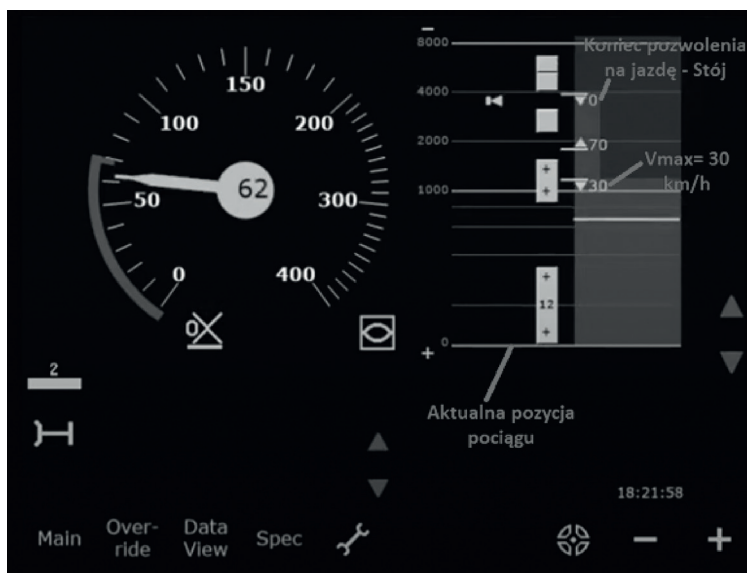
- Na liniach z półsamoczną blokadą liniową odległość między tarczą ostrzegawczą a semaforem jest równa drodze hamowania dla danej linii.
- Na SBL dwustawnej odstęp nie może być krótszy niż podwójna długość drogi hamowania ustalona dla danej linii.
- Na SBL trzystawnej odstęp nie może być krótszy od przyjętej dla danej linii drogi hamowania.
- Na SBL czterostawnej (rys. 16) odstęp, z wyjątkiem odległości między ostatnim semaforem odstępowym i semaforem wjazdowym, nie może być krótszy od połowy drogi hamowania przyjętej dla danej linii.



Rys. 16. Długość odstępu między semaforami na czterostawnej SBL

Źródło: opracowanie własne.

W związku z powyższym maszynista pociągu poruszającego się po linii z czterostawną SBL o drodze hamowania 1300 m jest informowany 1950 m przed semaforem wjazdowym nakazującym zmniejszenie prędkości bądź zatrzymanie. Dla pociągów pasażerskich poruszających się z prędkością 160 km/h lub towarowych jadących 90 km/h odległość 1950 m jest zdecydowanie za mała, by w pełni wykorzystać korzyści płynące z hamowania elektrodynamicznego z odzyskiem energii. Maszynista, prowadząc pociąg pod nadzorem systemu ETCS, ma dostępny obszar podglądu. Dzięki niemu odpowiednio wcześniej uzyskuje informację o wymogu zmniejszenia prędkości. W przykładzie pokazanym na rysunku 17 maszynista jest uprzedzany o konieczności zatrzymania pociągu z wyprzedzeniem 4000 m, co pozwala mu w pełni wykorzystać styl jazdy oraz środki techniczne, by zmaksymalizować zysk energetyczny.



Rys. 17. Ekran DMI z informacją o sygnale „Stój”

Źródło: zbiory własne autora.

Zakończenie

Celem artykułu było ukazanie na płaszczyźnie historycznej początków kolei oraz zmian, jakie nastąpiły na przestrzeni lat. Skupiono się na przedstawieniu urządzeń bezpośrednio związanych z bezpieczeństwem prowadzenia ruchu kolejowego, które także poddane licznym udoskonaleniom ewoluowały wraz z postępem technologicznym.

Omówiono sygnalizację kształtową, której pierwowzorem był stworzony przez braci Chappe telegraf optyczny służący do porozumiewania się za pomocą znaków optycznych. Telegraf Chappe'a został pokazany po raz pierwszy we Francji w 1792 roku. Ulepszona przez Jana Baranowskiego sygnalizacja kształtowa, z drobnymi zmianami, jest do dziś szeroko stosowana na całym świecie. Dalej opisano sygnalizację świetlną, która obecnie jest najbardziej popularna.

Obszerna część została poświęcona wdrażanemu w całej Europie, a także poza nią systemowi ETCS. Za sprawą norm TSI system ten jest jednolity, funkcjonuje w ten sam sposób bez względu na kraj i umożliwia wykorzystanie tych samych pojazdów w różnych państwach. Scharakteryzowano poszczególne zasady jego działania oraz realizowane poziomy nadzoru. Dodatkowo w formie opisowej i obrazowej omówiono polecenia i informacje przekazywane za pomocą DMI oraz tryby pracy systemu ETCS.

Starano się ukazać wpływ stylu prowadzenia pociągu na zużycie energii. Przeprowadzono próby badawcze, które jednoznacznie dowiodły słuszności tezy, że stosowanie zasad jazdy ekonomicznej przynosi wymierne oszczędności energii. Ponadto postanowiono zbadać, ile energii zużywane jest podczas rozpędzania pociągu do prędkości rozkładowej w zależności od masy składu. Zbadano korzyści płynące ze stosowania hamowania z odzyskiem energii, a także ilość oddanej energii do drogi hamowania. Ostatnie badanie jest bezpośrednio powiązane z urządzeniami SRK, gdyż to od nich zależy, jak wcześniej maszynista zostanie uprzedzony o konieczności zmiany prędkości. A to z kolei znajduje odzwierciedlenie w ilości energii możliwej do oddania. Ze względu na czynniki wpływające na poprawę bezpieczeństwa oraz względy ekologiczne i ekonomiczne systemy bezpieczeństwa powinny być unowocześniane poprzez wdrażanie wspólnego i jednolitego europejskiego systemu ETCS.

Bibliografia

- Deutsche Bahn. Daten&Fakten 2022* (2022), https://ir.deutschebahn.com/fileadmin/Deutsch/2023/Berichte/DuFd_2022.pdf [dostęp: 12.02.2024].
- Emisja dwutlenku węgla (CO₂)* (2022), <https://dane.utk.gov.pl/sts/eko-kolej/emisja-dwutlenku-wegla-co2/19419,Emisja-dwutlenku-wegla-CO2.html> [dostęp: 12.02.2024].
- Heimann S. (2022), *Energiesparen unterwegs: die 15 besten Tipps*, <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/mobilitaet/energiesparen-unterwegs-14-tipps/> [dostęp: 12.02.2024].

- Ilgmann G. (1998), *Gewinner und Verlierer einer CO₂- Steuer im Güter- und Personenverkehr*, Ludwig Bölkow Stiftung.
- Krause T., Zimmermann U. (2015), *Untersuchung von infrastrukturellen Maßnahmen für den energieeffizienten Bahnbetrieb*, Master's, Technische Universität Berlin, Berlin.
- Wolny W. (2023), *Systemy sterowania ruchem kolejowym widziane z kabiny maszynisty*, dyplomowa praca inżynierska, Wydział Techniki i Informatyki Akademii Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi, Łódź, maszynopis niepublikowany.

Summary

Innovative procedures for driving an electric locomotive

This article offers a historical overview of railway traffic control devices used in the past. They laid the foundations for the construction of further, improved devices that have a decisive impact on the safety of railway traffic. Shape signaling is discussed, which with minor changes is still widely used around the world. Attention is also paid to traffic lights and a comparison of traffic lights in force in Poland and the Germany is provided. The article then discusses train traffic management based on semi-automatic and automatic blocking. The work presents two safety systems of conducting rail traffic: the SHP system (Automatic Braking of a Train) and the PZB system (intermittent automatic train running control). A significant part of the work is devoted to the ETCS system being implemented throughout Europe and beyond. The principle of operation, supervision levels and operating modes of the system are characterized. The style of driving a train and its impact on energy consumption is also discussed. This leads to a consideration of whether changes in the style of driving can, in practice, bring measurable effects in the form of energy savings.

Keywords: railway traffic control, train traffic safety, energy savings

About the Authors

Włodzimierz Wolny – a traction vehicle driver, driving PKP vehicles.

Maciej Puchała – a doctor of technical sciences specializing in information systems used in transportation and logistics. He has been a retired university teacher for several years.

Ten utwór jest dostępny na [licencji Creative Commons Uznanie autorstwa-Na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

