

Energochłonność jako kryterium optymalizacji miejskiego transportu publicznego¹

ANDRZEJ KRYCH

dr inż., Instytut Inżynierii Lądowej,
Politechnika Poznańska, Biuro
Inżynierii Transportu – Pracownie
Projektowe – Cejrowski & Krych,
e-mail: a.krych@bit-poznan.
com.pl

Streszczenie: Przegląd danych o zużyciu energii i energochłonności w publicznym transporcie zbiorowym wykorzystano do zbadania związków pomiędzy różnymi polami jego optymalizacji a energetyką transportu. Wskazano na podobieństwo efektu energetycznego z normatywnym podziałem modalnym oraz w rozdziale funkcjonalności pracy przewozowej pomiędzy komponentami systemu transportu publicznego. Zilustrowano również wpływ organizacji ruchu ulicznego (prędkości komunikacyjnej) i działań racjonalizujących rozkłady jazdy. Szczególną uwagę poświęcono komunikacji tramwajowej, w której występują znaczące różnice w zużyciu operacyjnym energii (zależnym od kinetyki w ruchu rozkładowym) i serwisowym (dopełniającej do finalnego zużycia energii). Ustosunkowano się do innowacji w napędach, zwracając uwagę na wzrost zużycia operacyjnego energii w nowoczesnym taborze tramwajowym i na potencjalne możliwości autobusów elektrycznych. W podsumowaniu wskazano na potrzebę prowadzenia gospodarki energetycznej w oparciu o monitorowanie rocznego popytu, badania zużycia operacyjnego, kontrolowanie zużycia finalnego, co umożliwiłoby planowanie interwencji w systemie transportu, szerszą wymianę doświadczeń oraz upowszechnienie najlepszych praktyk. Postuluje się w procesie aplikacji różnych działań stosować analizy korzyści energetycznych, niezależnie od konwencjonalnych analiz kosztów i korzyści ekonomicznych. Uznaje się kryterium energochłonności za wiodące w rozwoju zrównoważonej mobilności.

Słowa kluczowe: energochłonność, optymalizacja publicznego transportu zbiorowego, rozwój zrównoważony.

Zużycie energii przez tramwaj (MJ na pasażerokilometr przebytej drogi) wynosi 0,55 MJ/pkm, co jest znacznie bardziej energooszczędne niż większości innych rodzajów transportu.

Nie jest on szalenie zrównoważony, ponieważ wykorzystywana przez niego energia elektryczna nie pochodzi ze źródła odnawialnego.

Roger Harding, dyrektor generalny Tramlink, Croydon, 2003

Wprowadzenie

Zagadnienie niskiej emisji, wykorzystania odnawialnych źródeł energii, zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych stanowią dla współczesnego świata wyzwanie najwyższej rangi. Dotyczą nie tylko animatorów oraz menadżerów polityki i gospodarki, ale także każdego konsumenta, w tym użytkownika transportu. Szczególnie dotyczy to także tych, którzy to użytkowanie organizują. Interesująca jest więc relacja między interwencją na rzecz optymalizacji transportu a energetycznym wyzwaniem. Zagadnienie to jest tym bardziej znaczące, iż gospodarka energetyczna powinna stanowić centralny instrument kreowania zrównoważonego rozwoju.

Przegląd publikacji i dokumentów w tym przedmiocie wskazuje na znaczący deficyt danych, informacji i metod dla całościowego ujęcia tej problematyki. Doceniając potencjał wiedzy, zaangażowania i praktycznego doświadczenia, wnoszonego na różnych polach techniki transportu, w szczególności napędu i mechaniki pojazdów, ciągle nie przebija się w środowisku inżynierskim świadomość konieczności optymalizacji transportu miejskiego w całej jego złożonej konfiguracji systemowej. I odwrotnie: przegląd Planów Gospodarki Niskoemisyjnej, może w mniejszym stopniu również Planów Transportowych, choć stanowi dobry trop, to w stopniu przeważającym wskazuje na deficyt profesjonalnej inżynierii w energetyce systemów transportu. Powyższe znajduje odzwierciedlenie w praktykowanej ścieżce pozyskiwania środków unijnych na produkty jej finansowania, głównie skoncentrowanej na zakupie elektrycznych lub hybrydowych autobusów, w pewnym stopniu rozbudowie tras tramwajowych. W polityce niskiej emisji stanowi to jedynie fragment uwarunkowań, zważywszy na pomijanie obligatoryjnej cechy poprawnego projektu inżynierskiego, jaką jest konieczność analizy zasięgu jego wpływu w przestrzeni i kompleksowego oddziaływania w skutkach [1].

Ze względu na brak danych eksperymentalnych o składowych komponentach energetycznej efektywności transportu miejskiego w jego systemowym ujęciu możemy o problemie mówić jedynie w oparciu o przyczynkowe dane. Brak jest dyskusji interdyscyplinarnej, łączącej wyniki badań i poglądów specjalistów oraz praktyków w problemach szczegółowych. Ponadto, biorąc pod uwagę dynamikę innowacji w zakresie środków niskiej emisji, aplikacji instrumentów inteligentnych, procesów dekarbonizacji czy form wspomagania bądź współdzielenia środków transportu w horyzoncie najbliższych dekad, trzeba przyrzeć się krytycznie klasycznej metodologii planowania transportu i roli prognoz ruchu. Podkreślmy raz jeszcze – bez postępu w efektywności energetycznej systemu transportu trudno jest mówić o jego zrównoważonym rozwoju.

Kryterium efektywności energetycznej a struktura zużycia energii finalnej

Zużycie energii w obszarach zurbanizowanych jest wysoce zróżnicowane. Wynika to ze względów klimatycznych, topograficznych, geopolityki energetycznej, dochodów ludności, gęstości zabudowy i zaludnienia miast, ich struktury i jakości transportu. Spośród 84 miast na świecie, pomijając wartości skrajne, emisja roczna CO₂ w podróżach osób kształtuje się od 200 do 4.000 G, przy czym w miastach

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2019.

europiejskich odnotowano poziom od 1.000 (Manchester) do 1.700 (Frankfurt) [2]. Niejednorodność ta dotyczy także polskich miast, osadzonych w stosunkowo zbliżonych warunkach geofizycznych i jednorodnych geopolitycznie. Według raportu Instytutu Rozwoju Miast (IRM [3], s. 47) w 11 metropoliach kraju roczna emisja CO_{2eq} na mieszkańca mieści się w zakresie od 15 w Gdyni do 26 Mg w Katowicach. W teście pracy podkreśla się brak związku tych emisji ze zużyciem energii. To ostatnie waha się w granicach od 12 (Szczecin) do 24 MWh (Poznań) rocznie. Podkreślmy, że wśród największych miast charakterystyka tego wskaźnika w formule per capita (pc) nie zależy od liczby mieszkańców².

Według analizy IRM transport w miastach chłonie 27% finalnego zużycia, nieco mniej niż budownictwo mieszkaniowe i publiczne (41%). Oznaczałoby to rząd 4 do 6 MWh(pc)/rok. Z pobieżnych analiz poznańskiego przypadku wynika, że sam transport publiczny nie partycypuje w tym zużyciu wartością większą od 0,5 MWh/rok(pc), a przy uwzględnieniu podróży samochodowych mieszkańców w obrębie miasta z lekka przewyższa 3 MWh/rok³(pc). Według [2] wśród cytowanych miast na świecie miasta europejskie zużywają na transport osób od 1 MWh/rok (pc) w Krakowie do 6,4 w Genewie. Można domniemywać zróżnicowanego zużycia energii transportu w największych miastach kraju, ale wiele wskazuje, że w transporcie publicznym niejednej metropolii potencjał oszczędności energii w skali miasta nie jest tak znaczny, choć w stopniu decydującym w każdym z nich zależy od podziału modalnego podróży, a tego wpływ może być ogromny. Jeffrey R. Kenworth na podstawie danych i badań 84 wspomnianych wcześniej miast podaje uśrednione zużycie energii na jednostkę wykonanej podróży (pas.km)⁴ (tabela 1). Pozwolimy sobie podane wartości cytować jak standardy orientujące. Łatwo się zorientować, że minimalizacja zużycia energii w procesie optymalizacji systemu transportu miejskiego opiera się na dekompozycji zadania optymalnego: maksymalizacji ruchu pieszego i rowerowego, minimalizacji samochodowego oraz optymalizacji transportu publicznego.

Należy podkreślić, że mowa jest o finalnym zużyciu energii w odróżnieniu od energii pierwotnej w rozumieniu Ustawy [6], tożsamej w tym względzie z dyrektywą unijną z 2012 roku. Pojęcie zużycia finalnego ma kluczowe znaczenie dla dalszych naszych rozważań jako podstawa oceny efektywności energetycznej mierzonej stosunkiem korzyści z użycia pobranej energii do jej zużytego zasobu⁵. Tak więc

zużycie finalne w transporcie publicznym winno obejmować każdy wydatek energetyczny, jaki towarzyszy świadczeniu usług przewozowych wyrażonych pracą przewozową [pas.km]. Odwrotną zależność, czyli zasób energii ([MJ] lub [kWh]) potrzebny dla jednostkowego efektu użytkowego [pas.km] zdefiniujemy jako energochłonność wybranego komponentu systemu transportowego lub jego wyodrębnionego komponentu. Ta miara efektywności częściej jest stosowana w publikacjach dotyczących transportu. Jest oczywiste, że wyborowi komponentu systemu towarzyszyć musi identyfikacja jego zużycia finalnego. Podstawą oceny energochłonności musi być okres roczny ze względu na cykle zmienności relacji między pracą przewozową [pas.km] a transportową [poj.km]. Iloraz ich wartości składa się na efektywność operacyjną [pas.km/poj.km]).

Tabela 1

Energochłonność rocznego zużycia energii według podstawowych środków transportu miejskiego (MJ/pas.km)	
Samochód osobowy*	2,45
Autobus (diesel)*	1,05
Kolej metropolitalna*	0,61
Metro*	0,46
Tramwaj*	0,52
Rower**	0,06
Pieszy**	0,16

Źródła:

* [4].

** [5], także Commission of the European Communities. Green Paper. Impact of Transportation on the Environment. Doc. COM(92), 46, 1992.

Energochłonność powinna mieć zasadnicze znaczenie w optymalizacji transportu publicznego, zarówno w procesie planowania układów transportowych, mobilności, parku taborowego, jak we wspomaganiu projektów, zarządzania i organizacji transportu. O ile zużycie finalne energii jest prostą pochodną jej zakupu przez operatora, grupę operatorów i organizatora transportu, o tyle diagnoza i analiza, aktywne zarządzanie energią oraz decyzje w transporcie publicznym wymagają danych agregowanych do różnych pól potencjalnej oszczędności energii.

Generalnie na zużycie finalne operatora składają się:

- zużycie energii operacyjne – na napęd i obsługę pojazdów w bezpośrednim świadczeniu usług przewozowych przez operatora transportu, czyli będące funkcją planowania, rozdziału taboru i organizacji rozkładów jazdy;
- zużycie serwisowe, związane z pozostałymi działaniami operatora, będące różnicą pomiędzy zużyciem finalnym i zużyciem netto.

Z powyższego względu należy mieć na uwadze finalne zużycie paliw płynnych w obsłudze ruchu pojazdów elektrycznych, jak energii elektrycznej w obsłudze i zarządzaniu ruchem operatorów autobusowych. Natomiast zużycie energii trakcyjnej tylko częściowo składa się na zużycie operacyjne, w części na serwisowe i jest częścią zużycia finalnego.

² Raport [3] uwzględnia w analizach Planu Gospodarki Niskoemisyjnej 153 miast w kraju, w tym 11 metropolii wyróżnionych z grupy miast wojewódzkich. Jednostkowe zużycie finalne (pc) w grupie tych miast nie zależy od liczby mieszkańców (poczynając od największych wynosi: Warszawa – 17, Kraków – 22, Łódź – 24, Wrocław – 16, Gdańsk – 12, Katowice – 22, Bydgoszcz – 20, Gdynia – 12, Toruń – 15 MWh/rok pc).

³ Bez transportu ładunków, ruchu tranzytowego oraz kolei.

⁴ Czyli energochłonności, o czym dalej.

⁵ Dokładnie: stosunek uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużycia energii przez ten obiekt, urządzenie techniczne lub instalację, albo w wyniku wykonanej usługi niezbędnej do uzyskania tego efektu (art. 2 pkt 3 Ustawy [6]).

Zużycie finalne, pozostając w związku z efektywnością energetyczną, wiąże się zasadniczo z głównym nurtem dokumentów europejskich dotyczących niskiej emisji. Wiążą one niskoemisyjność i efektywność energetyczną w tytule (jak np. [3,6]) i w treści, co w dość powszechnym odbiorze społecznym, a nawet urzędniczym, umyka uwadze w publicznym zatroskaniu o lokalną czystość powietrza bardziej niż o wpływ emisji globalnej na los planety. Wypada więc też podkreślić, że perspektywa finansowa UE na lata 2014 – 2020 stworzyła możliwości dofinansowania zarówno działań niskoemisyjnych, jak i działań poprawiających efektywność energetyczną. Ponieważ są to działania związane z długofalową polityką klimatyczną, ten kierunek finansowego wsparcia będzie zapewne wzmocniony, kontynuowany i monitorowany w sposób ciągły i w dłuższej perspektywie. Należy przy tym podkreślić, że dodatkową komplikację w strukturze formalnej wprowadza kryterium odnawialnych zasobów energii (OZE).

Jest niezwykle istotne, by rozumieć i wiązać zużycie finalne z efektywnością energetyczną, bez czego potoczne rozumienie niskiej emisji nie musi oznaczać finalnej efektywności. Zarysowuje się ona zarówno w procesie wytwarzania energii, jak w jej wykorzystaniu użytkowym. Diagnoza i instrumentalna rola zużycia finalnego jest więc kluczem i podstawą dla analiz głównych celów polityki energetycznej zawiązujących się wokół globalnej emisji gazów cieplarnianych (GHG), pyłów smogowych i wykorzystania odnawialnych zasobów energii.

Energochłonność w komponentach systemowych transportu

W roku bilansowym 2006/2007 energochłonność odnotowana dla układu londyńskiego metra liczona według finalnego rocznego zużycia (1.150 GWh) przy realizacji 7.655 mln pas.km. wynosiła 0,540 MJ/pas.km. Praktycznie w godzinie szczytu – 0,158 MJ/pas.km. Energochłonność londyńskich autobusów oceniona jest na 1,152 MJ/pas.km [5,7], a tramwaju Tramlink w Croydon 0,55 MJ/pas.km [8]⁶.

Według [9,10] do roku 2010/2011 praca przewozowa londyńskiego metra wzrosła o 16% przy utrzymaniu zużycia finalnego na podobnym poziomie. Oznaczało to obniżenie jego energochłonności (czyli wzrost efektywności) do poziomu 0,464–0,487 MJ/pas.km⁷. Podkreśliśmy, że

przytoczone wyżej dane są w zasadniczym stopniu pochodną atrybutów londyńskiego transportu publicznego, takich jak:

- relacja pracy przewozowej do transportowej (pas.km/poj.km),
- średnia prędkość komunikacyjna,
- rozkład oferty transportowej i popytu w cyklu całorocznym,

a w ogólności strukturalnego osadzenia tak szczególnych komponentów, jak metro i autobus w komplementarnym układzie systemowym. W skali Wielkiego Londynu rozgraniczenie funkcjonalności metra i autobusu jest wyraziste. Przykładowo, średnia prędkość komunikacyjna metra w Londynie wynosi 33 km/h, autobusu 18 km/h. Metro z ofertą 68,9 mln poc.km rocznie na sieci długości 250 km realizowało w roku 2008/2009 18.875 mln pas.km (128,8 pas.km/poc.km). Autobusy dla przewozu nieco mniejszej liczby 8.082 mln pas.km wykonują 7-krotnie większą pracę transportową: 486 mln poj.km, co czyni wskaźnik efektywności operacyjnej 16,6 pas.km/poj.km. Główną funkcją transportu autobusowego jest dostępność do transportu poprzez obszarową entropię jego potencjału, tak jak funkcją metra i innych form kolei miejskiej jest szybkość i wydajność. Pozwala to łączyć funkcjonalności w systemie w ekonomicznie efektywną całość.

Tramwaj londyński spełnia raczej rolę marginalną w całym Londynie, ale w Croydon jego rola jest wyrazista. Prędkość komunikacyjna osiągnięta w sieci wynosi 21,7 km/h, a na jego pracę transportową (2,7 mln poc.km) przypada 126 mln pas.km [11]. Efektywność operacyjna na poziomie 46,7 pas.km/poc.km w skali roku jest wysoka⁸.

Zużycie finalne w ruchu poznańskich tramwajów w 2018 r. (65,1 GWh) przy 404,04 mln pas.km [12] czyni wskaźnik energochłonności 0,580 MJ/pas.km, w tym 87% stanowi zużycie trakcyjne (56,5 GWh i 503MJ/pas.km). Przy aktualnej prędkości komunikacyjnej 20,4 km/h energochłonność zużycia operacyjnego szacuje się na podstawie aproksymacji punktów pomiarowych (por. tab. 2) na 0,321 MJ/pas.km, to jest 36 GWh, co stanowi 55% zużycia finalnego [12,13,14]. W autobusach MPK zużycie operacyjne (0,750 MJ/pas.km) obejmowało 71% finalnego zużycia paliw, a ich energochłonność wynosi około 1,050 MJ/pas.km. Autobusy przewożą rocznie 466 mln pas.km. W obu środkach transportu średnia długość przejazdu jest porównywalna (około 4 km) [13,15]⁹. W odróżnieniu od Londynu w Poznaniu rola obu środków jest bardziej substytucyjna niż komplementarna¹⁰.

⁶ Cały rozdział pracy Davida McKaya [5] jest publikowany w języku polskim w pracy [7]. W [5] przypisuje się tramwajom w Croydon 0,324 MJ/pas.km (cyt. „Całkowite zużycie energii w systemie tramwajowym w londyńskim Croydon (...) włączając zajezdnie tramwajowe i oświetlenie przystanków wyniosło 9 kWh na 100 pkm, przy średniej prędkości 25 km/h”, co wydaje się niewiarygodnie mało. Najprawdopodobniej dotyczy pierwszej trasy po jej uruchomieniu (na linii New Addington–Wimbledon prędkość komunikacyjna wynosi obecnie 23,0 km/h przy średniej gęstości przystanków 0,750 m). W tekście przyjęto znacznie bardziej prawdopodobną efektywność zużycia finalnego (0,55 MJ/pas.km), tym bardziej wiarygodną, że pochodzi z monograficznego opracowania Christophera Halla, a w szczególności z niepublikowanej informacji dyrektora generalnego Tramlink [8], str. 128–129, por. motto).

⁷ Podany zakres wynika z prawdopodobnego błędu zaokrąglenia danych o zużyciu finalnym 1150 wg [9] wobec 1200 GWh wg [10]. Prognozy przewidują, że wzrost potoków i pracy transportowej w ciągu 10 lat w londyńskim metrze może spowodować wzrost zużycia finalnego o 30% (ibidem).

⁸ Gwoli uzupełnienia za [5]: energochłonność trolejbusów w Vancouver (15 km/h) przy 40 pasażerach oceniono na 0,252 MJ/pas.km.

⁹ Zużycie finalne w tramwajach poznańskich przed 2012 należałoby szacować przy średniej prędkości 19,5 km/h (20,4 km/h po 2015); w autobusach związku metropolitalnego (ZTM) przy średniej prędkości 22,2 km/h roczne potoki pasażerskie sięgają 467 mln pas.km [16]. Są to szacowania przybliżone przy założeniu tożsamości bilansu energii elektrycznej w układzie autobusowym z energetycznym zużyciem paliw płynnych w tramwajowym.

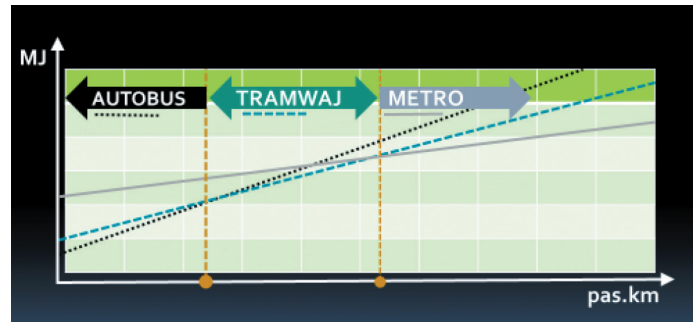
¹⁰ Diagnozę tego stanu można odczytać w tekście [13].

Tak więc zużycie finalne energii w ruchu tramwajowym w Poznaniu jest 1,8 (w Croydon może 1,7 – por. przypis 5), w komunikacji autobusowej 1,4 razy większe od zużycia operacyjnego. Trzeba zauważyć, że zużycie finalne w powyższym trybie obliczeń obejmuje około 5,3 GWh rocznie wydatku na ogrzewanie pudeł¹¹. Cesja tego wydatku na zużycie operacyjne oznaczałaby energochłonność większą o 0,047 MJ/pas.km średniorocznie lub w okresie grzewczym 0,188 MJ/pas.km. Jeżeli się dodatkowo oprzeć na przytoczonych danych dla londyńskiego metra, zużycie energii na pracę stacji (schody, oświetlenie, wentylacja), pracę zaplecza oraz całoroczny rozkład pracy transportowej powiększa zużycie finalne 3,4-krotnie w stosunku do zużycia operacyjnego liczonego w godzinach szczytu.

Powyższe okoliczności zarysowują pole optymalizacji energetycznej komponentów systemu w podziale ról na rynku przewozów pasażerskich. Wysoki pułap startowy w zużyciu energii serwisowej może być kompensowany tylko odpowiednio wysoką reaktywnością na rynku przewozów, w przeciwnym razie nigdy nie osiągnie przewagi w bilansie finalnego zużycia energii. Zilustrowano to na rysunku 1, którego logika nieodparcie kojarzy się z klasycznymi współzależnościami opisanymi przez Podoskiego w 1977 roku w kategoriach kosztów stałych i operacyjnych [16]. To strukturalne podobieństwo nie powinno dziwić, zważywszy na wysoką korelację efektywności energetycznej z efektywnością operacyjną z tytułu pośrednictwa jej składowych – wartości [pas.km] i (poj.km) oraz pewnej analogii zużycia serwisowego energii z wpływem kosztów amortyzacji wniesionego zainwestowania¹². W obu przypadkach dostosowanie podaży do popytu uwzględniające zróżnicowane właściwości komponentów albo minimalizuje koszty transportu (jak u Podoskiego), albo zużycie finalne energii w transporcie jak na rysunku 1.

Podsumujmy: energetyczna komplementarność w systemie jego komponentów jest strukturalnie spójna z komplementarnością energetyczną. W polu optymalizacji struktury wewnętrznej systemu transportu publicznego nie ma sprzeczności z celami gospodarki niskoemisyjnej. Jest też odwrotnie – optymalizacja strukturalnego podziału przewozów między komponentami (w tym wprowadzanie nowego komponentu jak np. metra, tramwaju) w oparciu o kryteria kosztów i korzyści ma także swoje odwzorowanie w kryterium energochłonności.

Trzeba mieć na uwadze, że w tym podziale znaczącą rolę może odegrać elektryczny transport autobusowy, który w zużyciu operacyjnym rokuje znaczącą przewagę nad konwencjonalnymi napędami na paliwa płynne, gaz, a także nad pojazdami hybrydowymi. Standardowy 12-metrowy pojazd o wykorzystanej w połowie pojemności, ciężarem z bateriami 13 do 15 t w przeciętnych warunkach (bez ogrzewania) zużywa 3,4 do 3,6 MJ/poj.km [17, 18]. Te rezultaty konkurencyjne również w stosunku do trolejbusów



Rys. 1. Wpływ podziału pracy transportowej między komponentami systemu transportu publicznego na finalne zużycie energii w zależności od potoków pasażerskich

są uzyskiwane w warunkach testów i symulacji. Kwestia zużycia serwisowego może się ujawnić po kilku latach ustabilizowania warsztatu operatorów. Otwarta pozostaje też kwestia pojemności większych pojazdów.

Minimalizacja i ocena energochłonności musi uszanować ograniczenia. Klasycznym przykładem może być uderzająco wysoka energochłonność operacyjnej pracy warszawskiego SKM oszacowana na 0,144 MJ/pas.km [7]. W istocie to brak taboru generował znaczne zatłoczenie pojazdów w godzinach szczytu, w pewnych przypadkach ograniczeniem mogłaby być także przepustowość sieci¹³. Dodatkowe kursy wpłynęłyby na wzrost energochłonności SKM, ale potencjalny brak akceptacji dla zbyt niskiego standardu podróżowania sprzyjać może wykorzystywaniu alternatywnych środków transportu o wielokrotnie większej energochłonności. Na taką też okoliczność powołano się, odwołując się we wstępie do konieczności badania wpływu, oraz zasięgu każdego projektu transportowego. Osobną potrzebą jest respektowanie systemowego otoczenia podsystemu w zarządzaniu i planowaniu.

Energochłonność transportu tramwajowego

W sieciach tramwajowych i autobusowych dynamiczna zmienność warunków ruchu ulicznego ma poważny wpływ na operacyjne zużycie energii. Warto zwrócić uwagę, że energochłonność komunikacji autobusowej jest zbliżona w Londynie, w Poznaniu i w standardowym uśrednieniu Kenwortha (tabela 1). Jest to rezultatem elastyczności tego środka transportu i znacznej wymienności pojazdów w parku nadążającej za zaawansowaniem technologii napędu. Znacznie silniejsze zróżnicowanie napotyka się w charakterystykach cytowanych dla transportu tramwajowego. Przykładem (tabela 2) mogą być wyniki badań zużycia operacyjnego energii przeprowadzone w Polsce z wykorzystaniem pojazdów testowych w latach 2010/2011 na trasach linii Tramwajów Śląskich (105Na), Wrocławia (205WrAS) i Tramwajów Warszawskich (Swing) [19].

Pomijając przewagę pociągów z napędem asynchronicznym nad taborom 105Na, zwraca uwagę znaczący wpływ ogrzewania pudeł (6,6 do 7,0 MJ/poc.km), co w estymacji rocznego zużycia energii (por. kol. 6) uwzględniono

¹¹ Obliczenie na podstawie badań [19] – por. tab.2.

¹² Por. Jan Podoski [16] rys. 7.1 komentarz dotyczących progów efektywności str. 157–158.

¹³ Autor cytatu w analogii do „londyńskiego” standardu sugerował 0,216 MJ/pas.km.

Tabela 2

Charakterystyki operacyjnego zużycia energii w badaniach [19]					
Typ pociągu	Teren płaski – P Pochylenia – G	Zużycie energii MJ/poc.km			Roczne zużycie (mln MJ/poc.km)
		Bez ogrzewania	Z ogrzewaniem	Na ogrzewanie	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(4)-(3)	(6)
105Na* skład dwuwagonowy	P	17,60	24,19	6,59	1,750
	G	21,78	28,50	6,72	
	G/P	1,24	1,18	–	
PROTRAM 205WrAS**	bd	15,60	22,61	7,01	1,354
PESA*** 120Na 1Swing	bd	14,76	19,08	4,32	1,234

* Średnie prędkości 15 – 16 km/h, średnie odległości między przystankami 518 m

** Średnia prędkość aktualnie 15,7 km/h, średnia odległość między przystankami 470 m

*** Badania PESY (3 miesiące pracy pojazdu testowego)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych [19]

poprzez aplikację kwartalnego okresu grzewczego¹⁴. Wpływ pochyłości terenu na przyspieszenia grawitacyjne w podwójnych składach 105Na bez zużycia mocy grzewczej sięga niemal 125% wartości zużycia w terenie płaskim. Przewaga alternatywnych, współczesnych konstrukcji napędu wynika z zastosowania silników asynchronicznych z falownikiem, co umożliwia hamowanie elektrodynamiczne z rekuperacją energii. Ma to wpływ na dobre osiągi pociągu 120Na-Swing i całej gamy najnowszych tramwajów wypełniających stopniowo współczesny park taborowy operatorów¹⁵.

W pociągach klasy 105N wykorzystujących prąd stały do napędu mechanizmu jezdnego wykorzystywane jest zaledwie czwarta część energii pobranej z sieci. W podobnych konstrukcjach tych lat – KT4 (Tatra, pociąg dwuczłonowy) stwierdzono, że pozostałe 12% energii tracone jest na wzbudzeniu i twornikach, a 63% na rezystorach początkowych wzbudzających i zasilających silniki prądu stałego poprzez nastawkę zmiany rezystencji. Wykazano, że samo zastąpienie rezystora przez konwenter IGBT spowoduje zmniejszenie zużycia o 46%. Z badań inżynierów z Tallina wynika, że przy wykorzystaniu akumulatorów lub falowników w podstacjach lub pojazdach na przechowanie energii pozyskanej z hamowania można osiągnąć nawet 60% oszczędności przy zachowaniu sieci prądu stałego zamiast droższej wymiany na napęd asynchroniczny modernizowanego taboru [20]¹⁶.

W pracy [21] potencjał wykorzystania strat w zużyciu operacyjnym energii w transporcie szynowym ocenia się nieco ostrożniej na 40%. Dość powszechne zastosowanie silników asynchronicznych w końcu ubiegłego wieku w odnawianych pociągach 105N zmniejszyło zużycie o 11,5

(w terenie płaskim P) do 28,5% (w terenie z pochyłościami G – por. 205WrAs – tabela 2). Jednak w systemie rekuperacji Swingu, podobnie jak w innych rozwiązaniach ze zwrotem energii do sieci trakcyjnej, występuje silna zależność efektu od gęstości ruchu pociągów. Wykorzystanie tego zwrotu wymaga pobrania odzysku przez inny nadto nie oddalony od niego pociąg. Możliwość znacznej poprawy energochłonności w napędach asynchronicznych upatruje się raczej w hybrydyzacji układu napędowego poprzez system magazynowania strat (ESS – to jest: *energy storage system*). Badania symulacyjne modelu współpracy układu napędu, trakcji i podstacji wykazały, że w stosunku do pobranego prądu z podstacji można zaoszczędzić 24 do 28% energii, niezależnie od profilu osi toru i obciążeń statycznych – to jest odbiorników niezależnych od ruchu [21]¹⁷.

Upatrywanie szybkiego postępu w energochłonności w procesie odnowy parku taborowego może być jednak złudne. W poznańskim MPK 60% taboru posiada napęd asynchroniczny, jednak finalne zużycie energii trakcyjnej wzrosło w ciągu pięciu ostatnich lat o prawie 16% przy dość stabilnej wartości pracy transportowej i przy umiarkowanym postępie w upłynnieniu ruchu pociągów w sieci. Przy istotnym wzroście ciężaru nowoczesnego taboru problem jego energochłonności wymaga tym bardziej diagnozy systemu napędowego, trakcyjnego oraz podstacji, i w tym względzie w Poznaniu zainicjowano dopiero pewne kroki.

W całokształcie zagadnienia znaczącą okolicznością pozostaje znaczne zróżnicowanie uwarunkowań i poziomu energochłonności wśród operatorów transportu tramwajowego.

Energochłonność w ruchu miejskim

Wśród uwarunkowań energochłonności transportu publicznego szczególną rolę odgrywają prędkości komunikacyjne oraz napełnienie pojazdów.

W latach 1996–1997 przeprowadzono pomiary zużycia energii w pociągach tramwajowych w ramach projektu Ecos Phare w sąsiedztwie centrum Poznania [24]. Opis projektu opublikowano w 2001 roku (por. [25]). Projekt skoordynowano z uruchomieniem trasy szybkiego tramwaju (PST) i wyprowadzeniem z niej linii tramwajowych w obszar trzech skrzyżowań obejmujący cztery węzły rozjazdowe i trzy zespoły przystankowe na półkilometrowym odcinku ulicy Roosevelta. Patronat nad projektem sprawowała Agencja Novem, unijna platforma popularyzacji metod oszczędności energii spinająca efekty kilku projektów programu Ecos-Phare. Pomiary natężeń ruchu pojazdów, ruchu pasażerskiego, czasów obsługi, strat czasu i zużycia energii obejmowały ruch roczny w stanach przed projektem i po nim z ewaluacją stanu z projektem i bez niego. Ewaluację wsparło wykorzystaniem holenderskiego pro-

¹⁴ Pociągi 105N posiadają zdolność częściowej rekuperacji poprzez ogrzewanie nawiewu bez pośrednictwa grzejników.

¹⁵ Swing ma możliwość rekuperacji energii w warunkach nieprzeciążenia sieci trakcyjnej.

¹⁶ Autorzy przeprowadzili pomiary w różnych warunkach ruchowych na dwóch liniach tramwajowych w Tallinie. Uzyskali ponad 100 tys. profili. Ich rezultatem są cytowane diagnozy, dane i wyniki analiz.

¹⁷ Badania prowadzono w środowisku Matlab/Simulink, modelując układ podstacji, trakcji i napędu. Autorzy zastrzegają zarazem, że ze względu na ograniczoną trwałość zdolności superkondensatora (End of Life) możliwości te są nieco mniejsze, co szacują na zakres 18 do 25%.

gramu symulacyjnego Flexyt, zaadoptowanego do odwzorowania energetycznych i mechanicznych cech taboru 105N. Program skalibrowano w fazie badań i pomiarów w celu skonstruowania samego projektu, a następnie zbadania rezultatu po jego realizacji. Pomiaru zużycia energii prowadzono na trasach wszystkich linii tramwajowych w obszarze projektu z wykorzystaniem dwóch pociągów 105N wyposażonych we wmontowane instrumenty pomiarowe.

Po uruchomieniu trasy Poznańskiego Szybkiego Tramwaju nastąpił istotny wzrost potoków pasażerskich (por. wiersze 3 i 6 w tabeli 2¹⁸), a prędkość komunikacyjna tramwajów w obszarze projektu wzrosła z 12,8 do 17,1 km/h. Przez obszar przemieszczało się 168 pociągów w każdej godzinie ruchu dziennego. Operowanie rocznymi potokami i czterema stanami ruchu uwzględniającymi napełnienia pojazdów i prędkości komunikacyjne dało pewne możliwości realnego odwzorowania ich wpływu na operacyjne zużycie energii (por. tabele 3 i 4).

Nawet zgrubne założenie liniowego wpływu obciążenia pasażerskiego na zużycie operacyjne (por. tabela 3) generuje silnie nieliniowe wskaźniki energochłonności. W przypadku pary punktów odniesienia (wiersze 3 i 6) wzrost o 60% napełnienia zwiększa zużycie operacyjne energii o niecałe 10%, ale obniża energochłonność o 34%. Wiele pozyskiwanych danych o energochłonności komunikacji tramwajowej, tym bardziej autobusowej bez informacji o wykonywanej pracy przewozowej, szczególnie w ujęciu danych w skali rocznej, ma zatem niewielkie znaczenie poznawcze. Zilustrowana zależność związana jest z relacją między ciężarem pociągu 105N a obciążeniem pasażerskim. Wpływ tego obciążenia na zużycie operacyjne energii w komunikacji autobusowej jest znacznie silniejszy, a w przypadku cięższych składów kolejowych odwrotnie – znacznie słabszy¹⁹.

Ze wzrostem ciężaru pojazdu nabiera znaczenia dynamika ruchu – szczególnie w pojazdach szynowych, w których znaczną część wydatku energetycznego pochłaniają przyspieszenia. Teoretyczny stan płynnego przejazdu, bez potrzeby przyspieszenia przy słabych oporach ruchu na szynie, wiąże się z wydatkiem energii wyłącznie na zapotrzebowanie statyczne (oświetlenie, ogrzewanie, nawiew i klimatyzacja, urządzenia sterowania i informacji itp.) i jest to wartość stała, niezależna od prędkości komunikacyjnej, stanowiąca 15 do 20% zużycia operacyjnego. To oczywiście oznacza, że przy większych prędkościach komunikacyjnych funkcja zmienności odchyła się asymptotycznie od prostej linii regresji uchwyconej w parze punktów jej estymacji w typowych warunkach sieci miejskiego tramwaju (por. rys. 2). Szacowania oparte na zależności liniowej są tym bardziej ryzykowne, im bardziej płynny ruch pociągów prowadzony jest na większych odległościach międzyprzy-

¹⁸ Nieznacznie wzrosło natężenie pociągów (jedna linia dodatkowa), zmieniły się relacje ich przejazdu na skrzyżowaniach, potok pasażerski w decydującym stopniu przejęty został z transportu autobusowego.

¹⁹ W cytowanych badaniach [19] pojazdy testowe na liniach Tramwajów Śląskich wypełniono workami z piaskiem, niestety nie podano symulowanego tym sposobem poziomu napełnienia.

Tabela 3

Związek operacyjnego zużycia energii z napełnieniem pociągów 105N ¹ przy średniej prędkości komunikacyjnej w obszarze projektu [22]17,1 km/h.					
Stan	Napełnienie średnioroczne [pas.km/poj.km]	Roczna praca przewozowa [mln pas.km]	Roczne zużycie operacyjne [mln MJ]	Energochłonność operacyjna [MJ/pas.km]	
				Bez ogrzewania	Z ogrzewaniem ²
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	100	55,0	8,76	0,159	0,178
2	90	49,5	8,54	0,173	0,192
3	80 ³	44,0	8,32	0,189	0,210
4	70	38,4	8,11	0,211	0,235
5	60	32,7	7,90	0,242	0,271
6	50 ⁴	27,1	7,69	0,284	0,318
7	40	21,6	7,47	0,346	0,369
8	30	16,1	7,25	0,450	0,507
9	20	10,5	7,04	0,670	0,755
10	10	5,0	6,82	1,364	1,535
11	1	0,555	6,60	12,000	13,71

¹przy założeniu liniowego wpływu napełnienia na zużycie: kol.(4)=6,605+0,0215kol.(2) – estymacja dla stanów w w.(3) i (6)
²wg kalkulacji za [19] przyjęto 6,85MJ/poc.km z wpływem jednego kwartału na wartości roczne: kol.(6)=[0,25x6,85:kol.(2)]+kol.(5)
³stan napełnienia i zużycie energii po realizacji Projektu i uruchomieniu PST
⁴stan napełnienia i zużycia energii po realizacji Projektu bez PST
⁵wartość tożsama z pracą transportową w obszarze (1 pas.km= 1 poc.km)
Kursywa – estymacja liniowa

stankowych, bez pochyłeń i łamania trasy w planie. Ma to znaczenie przy ruchu kolejowym, przy prędkościach komunikacyjnych powyżej 40 km/h. W tabeli 4 zestawiono kilka przypadków, w których energochłonność operacyjna określona została dla znanego nam poziomu prędkości komunikacyjnych. Warto zwrócić uwagę na relatywnie wysoką energochłonność pojazdów wieloczlonych w stosunku do taboru 105N i że dotyczy ona nowocześniejszych od 105N pociągów wieloczlonych, może poza zmodernizowaną jednostką 205WrAS.

Zależność zużycia paliw w miejskim transporcie autobusowym od poziomu kongestii badano w procesie symulacji

Tabela 4

Wpływ prędkości komunikacyjnej na energochłonność w transporcie tramwajowym odniesiona do charakterystyk funkcjonalnych obszaru Projektu Ecis-Phare (potok roczny 24,318 mln pas.km, 0,543 poc.km, efektywność operacyjna 45 pas.km/poc.km)				
Prędkość komunikacyjna km/h	Zużycie operacyjne w obszarze badania [mln MJ]	Energochłonność zużycia operacyjnego ² [MJ/pas.km]	Wskaźnik wyjściowy	Energochłonność zużycia finalnego ³ [MJ/pas.km]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
12,8 ¹	9,80	0,403	9,80 MJ	0,685
15,5 ²	9,55	0,393	17,6 MJ/poc.km	0,668
15,7 ³	8,47	0,348	15,6 MJ/poc.km	0,592
17,1 ¹	8,32	0,342	8,32 MJ	0,581
18,7 ⁴	7,81	0,321	7,81 MJ	0,546
19,9	8,46	0,348	Zużycie finalne	0,592
20,4 ⁵	7,83	0,322	Zużycie finalne	0,547
21,7 ⁶	7,86	0,324	Zużycie finalne	0,550
27,8 ⁷	5,88	0,272	Estymacja	0,463
Bez obciążień dynamicznych ⁸	1,25	0,038	15%	0,064

¹Projekt Ecos Phare, 105N, 1996
²Tramwaje Śląskie, 105Na, 1999 (tabl. 2 [19])
³Wrocław, 205WrAS, 1999 (tabl. 2 [19])
⁴Poznań, ekstrakopolacja wg Projektu Ecos Phare
⁵Poznań, sieć, 2018, (podstawa – zużycie finalne)
⁶Tramlink, Croydon, [5,9,10]
⁷Linia 14, 2018 (Poznań, tab.)
⁸Przyjęto 20% kol. (2) przy średniej prędkości 18,7 km/h

ruchu w sieci ulic Poznania, generując zmienne wartości produkcji ruchu, z tym samym poziomem kongestii w obszarze administracyjnym miasta [23]. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem programu mezosymulacyjnego SATURN. Transformacja uzyskanych rzędnych tej zależności do charakterystyk energochłonności aktualnego transportu w obszarze metropolitalnym miasta przedstawiona jest w tabeli 5, a obraz tej zmienności pokazano na rysunku 2. Jest on więc pochodną wkomponowanego w algorytm programu symulacyjnego związku pomiędzy prędkością komunikacyjną a zużyciem paliwa.

Energochłonność a organizacja pracy transportowej

W tabeli 6 zestawiono charakterystyki poznańskich linii tramwajowych i oszacowanie ich energochłonności, dokonując podziału rocznego zużycia finalnego energii w sektorze tramwajów poznańskiego MPK. Zużycie serwisowe i 15% zużycia operacyjnego rozdzielono proporcjonalnie do wykonanej pracy transportowej [poc.km]. 85% zuży-

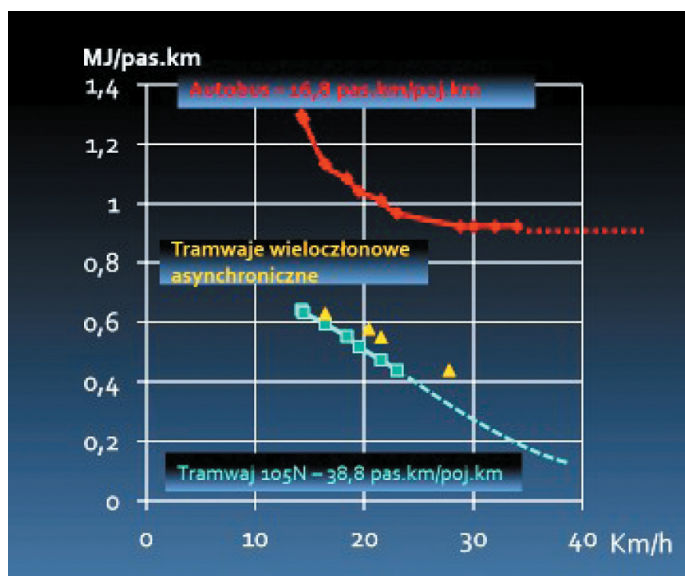
Tabela 5

Wpływ prędkości komunikacyjnych na energochłonności w transporcie metropolitalnym autobusowym				
Prędkość komunikacyjna km/h	Zużycie paliwa l/100km	Zużycie paliwa l/pas.km ¹	Energochłonność zużycia operacyjnego MJ/pas.km	Energochłonność zużycia finalnego MJ/pas.km
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
14,2	45	0,0267	0,961	1,345
14,4	44,5	0,0264	0,951	1,331
16,4	39,5	0,0234	0,842	1,174
18,35	37,5	0,0223	0,803	1,124
19,5	36	0,0214	0,770	1,079
21,6	35	0,0208	0,748	1,047
23	33,5	0,0199	0,716	1,003
28,8	32	0,0190	0,684	0,957
30	32			
32 – 34	32			

1 – przy wskaźniku rocznej efektywności operacyjnej 16,83 pas.km/poj.km

2 – 36 MJ/litr paliwa

3 – przelicznik 1,4 w stosunku do zużycia operacyjnego



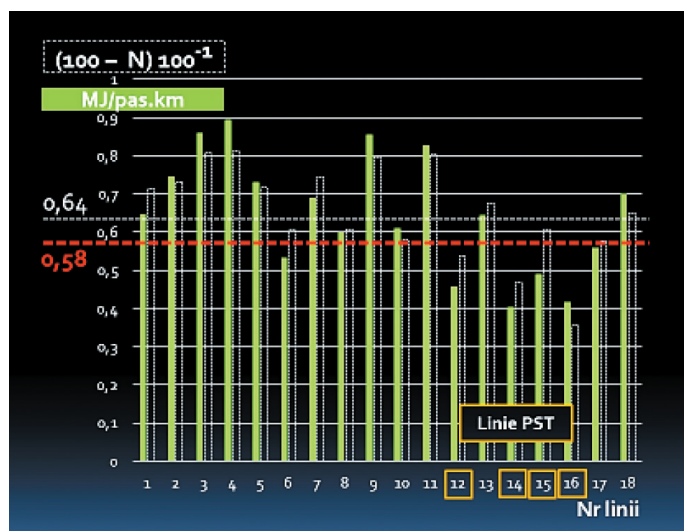
Rys. 2. Zależność energochłonności od prędkości komunikacyjnej dla zużycia finalnego energii

cia operacyjnego obliczono według jego liniowej zależności od prędkości komunikacyjnej. Celem zestawienia jest ocena rozkładu cechy energochłonności w potencjale przewozowym transportu tramwajowego. Rozrzut od 0,403 do 0,895 MJ/pas.km wskazuje na ponad dwukrotne przewyższenie linii o minimalnej w stosunku do maksymalnej energochłonności. Jednak najważniejszą konkluzją jest zilustrowana na rysunku 3 współmierność energochłonności z efektywnością funkcjonalną.

Na rysunku 4 odwzorowano wyniki badań symulacyjnych układu linii w sieci tramwajowej w dobie standardowej [26]. W procesie optymalizacji wypracowano jako jedną z opcji pakiet 8 linii. Po skorygowaniu ich marszrut

Tabela 6

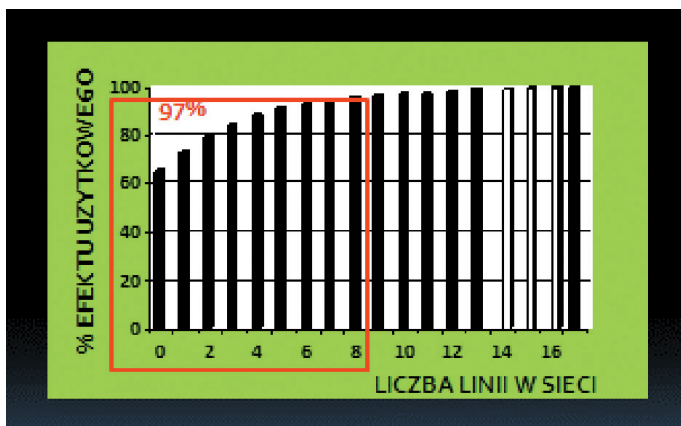
Nr linii	Praca		Efektywność funkcjonalna pas.km/poc.km	Prędkość komunikacyjna	Energochłonność [MJ/pas.km]		
	Przewozowa mln pas.km	Transportowa poc.km			Część operacyjna	Część serwisowa	Ogółem
01	26,863	0,932	28,8	22,10	0,294	0,354	0,648
02	13,089	0,488	26,8	16,05	0,352	0,393	0,745
03	6,201	0,323	19,2	18,65	0,314	0,546	0,860
04	8,332	0,441	18,9	19,14	0,318	0,577	0,895
05	14,546	0,512	28,4	15,67	0,360	0,371	0,731
06	30,391	0,767	39,6	19,33	0,266	0,266	0,532
07	15,887	0,623	25,5	21,13	0,278	0,413	0,691
08	22,207	0,566	39,2	17,73	0,331	0,268	0,599
09	11,743	0,579	20,3	17,21	0,337	0,518	0,855
10	19,729	0,489	40,3	16,60	0,350	0,261	0,611
11	8,858	0,447	19,8	20,18	0,296	0,531	0,827
12	37,718	0,818	46,1	24,90	0,230	0,228	0,458
13	23,467	0,726	32,3	18,45	0,318	0,326	0,644
14	30,836	0,578	53,3	27,78	0,206	0,197	0,403
15	30,506	0,776	39,3	25,73	0,223	0,268	0,491
16	59,588	0,925	64,4	23,27	0,253	0,163	0,416
17	25,741	0,581	44,3	18,66	0,341	0,237	0,558
18	18,352	0,601	35,0	16,20	0,350	0,351	0,701
Σ	404,045	11,141	36,3	20,44	0,289	0,291	0,580



Rys. 3. Energochłonność linii tramwajowych Poznania na tle ich efektywności funkcjonalnej N w formule $F_{00} = (100 - N)100^{-1}$

utrzymały one transfer przejazdów bezpośrednich w 97%, tracąc 7% pasażerów na rzecz linii autobusowych przy niewielkim pogorszeniu wskaźnika przesiadek obligatoryjnych i przy porównywalnym czasie podróży w systemie. Energochłonność komunikacji autobusowej poprawiłaby się o kilka procent przy znikomym wzroście zużycia energii, ale zużycie finalne komunikacji tramwajowej, licząc w samym tylko zakresie operacyjnym, zmniejszyłoby się o co najmniej 20%. Nie jest to jednak opcja najlepszej ścieżki dla rozwoju sieci tramwajowej. Rezerwa jej potencjału może być wykorzystana na opcje alternatywne poprawiające zarówno cechy energetyczne, jak i kosztowe w strukturze transportowej miasta. Wśród opcji rozważanych samo tylko zwiększenie częstości kursowych w pakiecie 10 lub 12 linii komunikacyjnych dawało obiecujące rezultaty, przejmując pasażerów z linii autobusowych i skracając znacząco czasy podróży w całym systemie, przy utrzymaniu obecnego poziomu kosztu.

Warto zwrócić uwagę, że subrozkłady sobotnie, niedzielne, świąteczne czy wakacyjne optymalizuje się praktycznie prawie wyłącznie przez częstości kursowe. W znikomym stopniu odwzorowują one możliwości substytucji komunikacji tramwajowej przez autobusową w niszowych obszarach popytu. Przedstawione wyżej rezultaty uwzględniają roczną pracę transportową z aplikowanymi subrozkładami jako krotność standardowej doby (334 w komunikacji autobusowej i 312 w tramwajowej). Praca przewozowa wynika z pomiarów prowadzonych w ramach Kompleksowych Badań Ruchu w 2000 roku (odpowiednio 314 i 272). Jest to minimum możliwości adaptacji danych dobowych do wartości rocznych, które warto racjonalnie znormalizować do czasu, aż monitorowanie popytu w całym cyklu rocznym będzie możliwe.



Rys. 4. Minimalizacja liczby linii tramwajowych dla realizacji co najmniej 97% przejazdów bezpośrednich w badaniach symulacyjnych [26].

Podsumowanie

1. Obniżenie energochłonności i zużycia finalnego energii

Opierając się na przyczynkowych w istocie zasobach badań i danych, wykazano, że na różnych poziomach optymalizacji transportu miejskiego, od planowania rozwoju systemu transportu przez kształtowanie miasta, podziału zadań przewozowych, organizację i zarzą-

danie ruchem ulicznym po operacyjne konstruowanie rozkładów jazdy, nie występują rozbieżności strukturalne pomiędzy kryteriami ekonomicznymi oraz energochłonnością środków transportu. Przy pełnym poszanowaniu tych pierwszych to jednak kryterium energochłonności (obok udziału mixu z OZE) w zużyciu finalnym wydaje się najbliższe istoty kształtowania transportu zrównoważonego.

2. Polityka i gospodarka energetyczna

Zaawansowanie badań nad energochłonnością oraz jej związków z organizacją ruchu, podziałem pracy transportowej oraz planowaniem wydaje się niezbędnym krokiem dla prowadzenia gospodarki energetycznej²⁰. Zużycie finalne energii w transporcie publicznym jest łatwe do zidentyfikowania. W świetle praktyki większych miast stosunkowo dostępne pozostają dane o pracy przewozowej, chociaż stosowane przeliczniki pracy godziny szczytu i doby do pracy rocznej mogą budzić zastrzeżenia i albo powinny być znormalizowane, albo podlegać lokalnemu monitorowaniu. Także operacyjne zużycie energii na kinetykę pojazdów jest realne przy wykorzystaniu transferu danych z komputerów pokładowych, chociaż przy rozwiniętych w wielu miastach instrumentach ITS brak jest stosownych interfejsów oraz oprogramowania dla syntezy, stosownych diagnoz i analiz operacyjnego zużycia energii.

3. Tramwaje i autobusy elektryczne

Energetyczna użyteczność komunikacji szynowej wyznaczyła całą ścieżkę rozwoju transportu, poczynając od epoki pary przez etap elektryfikacji po nadzieje współczesnych pokładane w możliwości inteligentnych sieci i autonomicznych pojazdów²¹. Istotą środków szynowych jest niski opór toczenia koła po szynie. Jeżeli dodać niewspółmiernie do tego wysokie zużycie energii grzewczej, klimatyzację, system informacji pokładowej, ciężar nowoczesnych pojazdów wieloczołowych, różne warunki geometrii toru (w pionie i poziomie), relatywnie niską wymiennność taboru w parku, różnice w energochłonności są trudne do uogólnienia i pozostają indywidualnym atrybutem operatora i specyfiki miejscowej sieci. Praktyka sygnalizuje, że nowoczesny wieloczołowy tabor jest bardziej energochłonny, na odwrotny trend wskazują testy autobusów elektrycznych. Ta tendencja może prowadzić do przesunięcia granicznych kryteriów pomiędzy funkcjonalnością tramwajów i autobusów w odniesieniu do popytu, przede wszystkim zasadniczego zwiększenia prędkości komunikacyjnych, konieczności optymalizacji rozkładów jazdy w sieciach tramwajowych i stosownych przekształceń jej układów sieciowych.

²⁰ Zarząd Oddziału Poznańskiego SITK podjął próbę w tym kierunku, powołując w marcu 2019 r. wielodyscyplinarny zespół, w skład którego rekomendowani zostali specjaliści jednostek transportowych operujących w obszarze metropolitalnym.

²¹ Warto przy okazji zauważyć, że historia autonomicznych pojazdów szynowych w ruchu miejskim dobiega niemal 40 lat (system VAL w Lille funkcjonuje od 1983 r.) i to w istocie inteligentne sieci pozostają dzisiaj jednym z podmiotów niespełnionej gry o efektywny transport.

4. Planowanie sieci i układów transportowych

Koszty inwestycji w rozwój sieci tramwajowej i/lub metra powinny być związane z pełną analizą skutków energetycznych w całej sieci transportu publicznego i przełożeniem potoków między komponentami systemu. Ma to wymierny wpływ na ich energochłonności i powinno podlegać stosownej interwencji. Bez analiz koncepcji nowych tras szynowych z integralnym planem interwencji w układ i marszrutyzację linii komunikacyjnych w całym systemie nie da się wyrazić wystarczająco rzetelnej i profesjonalnej opinii. Warto też zwrócić uwagę, że oś transportowa powinna stanowić podstawę zrównoważonej struktury miasta.

5. Energochłonność i zużycie energii a analiza kosztów i korzyści

Wobec końcowej sentencji pierwszego wniosku wart dyskusji jest postulat prowadzenia analizy energetycznej niezależnie od konwencjonalnej analizy kosztów i korzyści ekonomicznych projektów interwencji. Z punktu widzenia istoty transportu zrównoważonego kwestia ta ma kluczowe znaczenie, ale rozwinięcie tej tematyki do poziomu cen energii, organizacji przepływów finansowych, formowania mixu energetycznego i praktyki planowania, wymagałoby osobnego artykułu. Jedyne odniesienie, do którego możemy się tutaj odwołać, to słynna kontestacja pewnego filozofa z Królewca.

Literatura

- Adler H., *Economic Appraisal of Transport Projects – A Manual with Case Studies*, Published for World Bank, The John Hopkins University Press, London and Baltimore, 1973.
- Newman P., Kenworth J., *Evaluation the Transport Sector's Contribution to Greenhouse Gas Emissions and Energy Consumption*, W: Salter R., Dhar, S., Newman, P., Technologies for Climate Change Mitigation – Transport sector, UNEP, 2011.
- Niskoemisyjność i efektywność energetyczna. Raport o stanie polskich miast* (red. Racewicz I.), Obserwatorium Polityki Miejskiej, Instytut Rozwoju Miast, Kraków 2017.
- Kenworthy J., *Energy Use and CO2 Production in the Urban Passenger Transport Systems of 84 International Cities: Findings and Policy Implications*, W: Droege, P. (ed). Urban Energy Transition, Elsevier, 2008.
- MacKay D., *Sustainable Energy – without the hot air*, UIT, Cambridge, 2009, wersja elektroniczna (23.02.2019): <http://www.inference.org.uk/sustainable/book/tex/sewtha.pdf>
- Ustawa z 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej.
- Lepszy Transport*, w: *Ziemia na rozdrożu*, dostęp 24.02.2019: <https://ziemianarozdrozu.pl/artukul/1990/lepszy-transport>
- Hall Ch., *An Evaluation of the Sustainability of the Tramlink in Croydon*, UMI –Dissertation Publishing, London 2014.
- Travel in London, Report 4, Transport for London, 2011.
- Payne K., *Keeping track of energy*, Ingenia online, Article – Issue 54, March 2013.
- Annual Report and Statement of Accounts, Transport for London, 2010/2011.
- BIT sp. J. *Aktualizacja planu transportowego obszaru metropolitalnego Poznania*, Poznań 2019.
- Krych A., *Tramwaj jako podmiot strategii i logiki interwencji*, w: *Celowość, efektywność i skuteczność projektu transportowego*, materiały X konferencji naukowo-technicznej, (red. Krych, A.), SITK RP Oddział w Poznaniu, Poznań–Rosnówko 2015.
- Koszty kalkulacyjne 2007–2014, 2017–2018 MPK w Poznaniu.
- Igliński H., *Energy Efficiency of Passenger Transport in Poznan Agglomeration in the Face of Peak Oil*, w: *Technology Management for Sustainable Production and Logistics*. EcoProduction. Springer–Verlag, red. Golińska, P., Berlin–Heidelberg 2015.
- Podoski J., *Transport w miastach*, WKiŁ, Warszawa 1977.
- Gis W., Kruczyński S., Taubert S., Wierzejski A., *Studies of energy use by electric buses in SORT tests*, Combustion Engines, 2017, 170(3).
- Lajunen, A., *Energy Consumption and Cost–benefit Analysis of Hybrid and Electric CityBuses*, Journal of Transportation Research, Part C, vol. 38, Jan. 2014.
- Kuminek T., *Energy Consumption in Tram Transport*, Logistic and Transport, № 2 (18), 2013.
- Joller J., *Research of Trams Traction Drives*, na podstawie: Joller J., Arukivi A., Mälter M., *Power Measurements of Trams and Trolleybuses in Tallinn's Traffic Conditions*. Report of research work No. 677 L, Tallinn Technical University. Tallinn, 1998. Dostęp: <http://www.ene.ttu.ee/elektriajamid/teadus/artiklid/jjoller/3joller.html>
- Barrero R., Van Mierlo J., Tackoen X., *Energy Savings in Public Transport*, IEEE Vehicular Technology Magazine Vol. 3, Issue 3, 2008.
- Badanie korzyści dynamicznych i energetycznych z realizacji projektu pilotażowego Ecos – Phare systemu sterowania ruchem w rejonie Ronda Kaponiera i Mostu Teatralnego w Poznaniu. Ewaluacja Projektu. Raport C – Końcowy. Wyniki pomiarów zużycia energii i dynamiki ruchu tramwajowego po uruchomieniu Projektu, Politechnika Poznańska, Poznań 1999.
- Cudzilo J., Krych A., Thiem J., *Network optimization using simulating Saturn procedure*: Conf. Modelling and Management in Transportation, vol. 2, Euro Working Group of Transportation, Poznań–Kraków 1999.
- Badanie korzyści dynamicznych i energetycznych z realizacji projektu pilotażowego Ecos-Phare systemu sterowania ruchem w rejonie Ronda Kaponiera i Mostu Teatralnego w Poznaniu. Ewaluacja Projektu, Raport C – końcowy, Wyniki pomiarów zużycia energii i dynamiki ruchu tramwajowego po uruchomieniu Projektu, Politechnika Poznańska, 1966.
- Krych A., *Ewaluacja pilotażowego projektu Ecos–Phare inteligentnego sterowania ruchem ulicznym z priorytetem dla tramwaju w Poznaniu*, w: *Problemy komunikacyjne w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego*, materiały X konferencji naukowo-technicznej, SITK RP – Oddział w Poznaniu, Poznań 1997.
- Cejrowski M., Krych A., *Optymalizacja priorytetowego pakietu zsynchronizowanych linii komunikacyjnych*, w: *Wydajność systemów transportowych*, materiały X konferencji naukowo-technicznej, (red. Krych, A., Rychlewski, J.), SITK RP Oddział w Poznaniu, Poznań–Rosnówko 2013.