

## Ograniczanie energochłonności zelektryfikowanego transportu miejskiego: przegląd metod i doświadczenia eksploatacyjne

### Limiting energy consumption of the electric public transport: review of methods and operational experience

*Transport jest jednym z głównych konsumentów energii. Rosnące ceny nośników energii oraz wzrost zagrożeń ekologicznych czynią coraz bardziej istotnym ograniczanie zużycia energii w sektorze transportowym. W artykule przedstawiono doświadczenia w redukcji zużycia energii Przedsiębiorstwa Komunikacji Trolejbusowej w Gdyni.*

*Transport is one of the main energy consumers. Increasing prices of energy products along with the rise of environmental hazards, make it even more important to limit the energy consumption in the transport sector. This article presents experiences in the reduction of energy consumption of the Trolleybus Communication Enterprise in Gdynia.*

#### 1 WSTĘP

Kryzys paliwowy lat sześćdziesiątych XX wieku oraz wzrost świadomości ekologicznej społeczeństw, w szczególności zachodnioeuropejskich, zainicjował rozwój technologii związanych z redukcją energochłonności transportu elektrycznego. Dotychczasowe starania związane z redukcją energochłonności dotyczyły głównie zwiększenia efektywności układów napędowych, zastosowaniu zasobników energii elektrycznej lub zwiększenia efektywności podstacji trakcyjnych. Niedoceniany był wpływ struktury układu zasilania na energochłonność transportu miejskiego. Projektując sekcjonowanie odcinków zasilania oraz układ zasilaczy brano głównie pod uwagę niezawodność układu zasilania na wypadek wystąpienia awarii sieci trakcyjnej, zasilacza lub podstacji trakcyjnej. Powyżej opisana metodologia znana jest z literatury przedmiotu lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku i jest wykorzystywana także współcześnie. Nie mniej, sieć trakcyjna jest miejscem powstawania strat przesyłowych, a jej struktura odgrywa znaczącą rolę w rozplywie energii rekuperacji. Warte uwagi prace w tym zakresie przeprowadzono w Tramwajach Warszawskich, jednak nadal to zagadnienie jest często pomijane.

#### 2. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA ELEKTRYCZNEGO TRANSPORTU MIEJSKIEGO

Jedną z najważniejszych zalet trakcji elektrycznej jest brak emisji zanieczyszczeń atmosfery w miejscu eksploatacji, co ma istotne znaczenie szczególnie w warunkach ruchu miejskiego. Jednak nadal znaczna

#### 1 INTRODUCTION

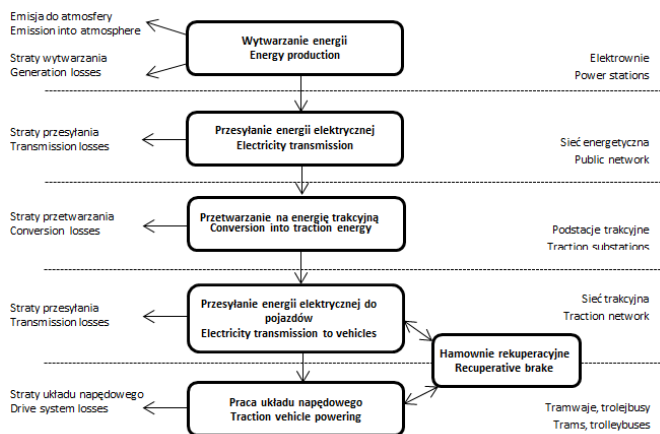
The fuel crisis of the 1960s and the increase of environmental consciousness among societies, especially those of western Europe, has initiated the technological development related to reduction of energy consumption of public transport. Current efforts related to the reduction of energy consumption were concerned mainly with increasing the effectiveness of drive systems, using electricity storages or increasing the effectiveness of traction substations. The impact of power supply's structure on the energy consumption of public transport was underestimated. When designing the supply sections and power supplies, it was mostly the reliability of power supply system that was considered, in case of a traction network emergency, or the breakdown of power supply or traction substation. Such methodology is known from the literature of this subject from the 1960s and 1970s and is still used now. However, the traction network is where energy transmission losses occur and its structure plays a major role in the distribution of recovered energy. Noteworthy studies on this subject were conducted on Warsaw Trams, however this issue still gets frequently ignored.

#### 2. ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC PUBLIC TRANSPORT

One of the major advantages of electric traction is the absence of emission of pollution into the atmosphere at the location of operation, which has

część energii elektrycznej wytwarzana jest w węglowych elektrowniach ciepłych i dlatego proces jej generowania jest źródłem zanieczyszczeń atmosfery. W związku z tym, istotnym zagadnieniem związanym z ograniczeniem emisji szkodliwych gazów do atmosfery jest zwiększenie efektywności energetycznej transportu elektrycznego.

Na całkowitą efektywność energetyczną transportu elektrycznego składa się wiele czynników, co schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Każdy z etapów generowania i konwersji energii elektrycznej związany jest z powstawaniem strat. Powstają one przy wytwarzaniu energii w elektrowni, przy przesyłaniu w publicznej sieci energetycznej, podczas przetwarzania w podstacjach trakcyjnych zasilających sieć trakcyjną, w sieci trakcyjnej. Także napędy pojazdów elektrycznych mają ograniczoną sprawność energetyczną. Istotnym elementem mającym wpływ na całkowitą sprawność transportu jest rekuperacja energii elektrycznej, która umożliwia odzyskanie części energii elektrycznej podczas hamowania pojazdów i ponowne jej wykorzystanie.



Rys. 1. Schemat przepływu energii elektrycznej i związanych z tym strat

Fig. 1. Diagram of electricity transmission and losses

Sprawność układów wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej jest przedmiotem wielu publikacji naukowych z zakresu systemów energetycznych. Efektywność energetyczna układów napędowych także jest obiektem licznych analiz i badań. Można zauważyć, iż efektywność obecnie produkowanych napędów elektrycznych jest bliska maksimum z technicznego punktu widzenia i dalszy rozwój napędów nie przyniesie zasadniczego wzrostu ich efektywności. Podobnie, układy napędowe eksploatowane w obecnie produkowanych pojazdach elektrycznych cechują się bardzo wysoką możliwością odzysku energii podczas hamowania. Współczesne podstacje prostownikowe wyposażone są w półprzewodnikowe prostowniki charakteryzujące się wysoką sprawnością, dlatego ich wpływ na całkowitą sprawność systemu zasilania jest znikomy.

a significant importance especially in the city traffic environment. However, the majority of electricity is still generated from coal power plants and this is why this process of producing energy is the source of atmospheric pollution. Therefore, increasing the energy efficiency of electric transport is a very important issue related to limiting the emission of harmful gases into the atmosphere.

Many factors contribute to the energy efficiency of electric transport, which is shown on figure 1. Each stage of electricity generation and conversion is related to the occurrence of losses. They occur when producing energy in the power station, during transmission in the public energy network, and during processing in traction substations powering the traction, in traction network. Drives of electrical vehicles also have a limited energy capability. An important element which has impact on the overall efficiency of transport is energy recovery, which allows for recovering some of the electricity during braking and reusing it.

Efficiency of energy generation and transmission system is the subject of numerous scientific publications in the field of energy systems. Energy efficiency of drive systems is also the subject of many analyses and studies. It can be observed that the efficiency of currently manufactured electric drives is very high in terms of technicalities and further development of drives will not result in a significant increase of their efficiency. Similarly, drive systems used in currently manufactured electric vehicles have a high ability of energy recovery during braking. Contemporary rectifier substations are equipped in semiconductor rectifiers characterised by high efficiency, hence their impact on the overall efficiency of the power supply system is negligible.

The element which is the most popular subject of scientific research related to energy efficiency is the overhead line and its power supply system. It is in the overhead line, where the largest losses occur during the transmission of electricity from traction substation to vehicles. Moreover, the spatial structure of power supply system has a major impact on the distribution of recovered energy and is a key factor which determines the level of the recovered energy used. However, this fact is underestimated within the environment of experts in the field of power supply systems for urban traction. The result of which, is designing and manufacturing of power supply systems for tram and trolleybus traction without considering the necessity to minimise transmission losses in overhead line, and increasing the recovery efficiency. On numerous occasions, the impact of spatial conditions on energy aspects is underestimated, and attention is focused either on the traction vehicles themselves, or the energy

Elementem, który najrzadziej jest obiektem badań naukowych związanych z efektywnością energetyczną jest sieć trakcyjna i układ zasilania sieci trakcyjnej. W niej powstają straty w trakcie dostarczania energii elektrycznej z podstacji trakcyjnej do pojazdów. Co więcej, struktura przestrzenna układu zasilania ma zasadniczy wpływ na rozptył energii rekuperacji i jest kluczowym czynnikiem decydującym o stopniu wykorzystania energii rekuperacji. Jednak fakt ten jest niedoceniany w środowisku ekspertów zasilania systemów trakcji miejskiej. Skutkiem tego jest projektowanie i budowa systemów zasilania trakcji tramwajowej i trolejbusowej bez brania pod uwagę konieczności minimalizacji strat przesyłu w sieci trakcyjnej i zwiększenia efektywności rekuperacji. Niejednokrotnie jest bagatelizowany wpływ uwarunkowań przestrzennych na aspekty energetyczne, uwaga jest koncentrowana bądź samym pojazdom trakcyjnym bądź efektywności energetycznej wytwarzania energii i dystrybucji w publicznej sieci energetycznej. Jednak, bazując na doświadczeniach eksploatacyjnych, straty przesyłowe w sieci trakcyjnej mogą sięgać wartości nawet 30%, a źle ukształtowany układ zasilania może znacznie ograniczyć wykorzystanie odzysku energii. Zagadnienia takie jak struktura przestrzenna układu zasilania, sekcjonowanie sieci trakcyjnej na odcinki zasilania i sposób zasilania odcinków są kluczowe w świetle minimalizacji energochłonności transportu publicznego. W środowisku eksperckim niedoceniane jest znaczenie topologii układu zasilania w odniesieniu do efektywnego wykorzystania rekuperacji. Niejednokrotnie zasobniki superkondensatorowe przedstawiane są jako jedyne skuteczne rozwiązanie umożliwiające efektywne wykorzystanie energii hamowania odzyskowego i marginalizowane jest jej wykorzystanie przez inne pojazdy.

### **3. STRUKTURA UKŁADÓW ZASILANIA MIEJSKIEJ TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ**

Tramwaje i trolejbusy są zasilane prądem stałym z napowietrznej sieci trakcyjnej. Energia dla celów zasilania trakcji miejskiej jest pobierana z publicznej sieci energetycznej wysokiego napięcia prądu przemiennego i ulega przekształceniu na prąd stały w podstacjach trakcyjnych, gdzie także następuje obniżenie wartości napięcia. Po transformacji i wyprostowaniu energia z podstacji trakcyjnych doprowadzana jest do punktów zasilania sieci trakcyjnych za pomocą kabli zasilających, tzw. zasilaczy. Ze względów estetycznych zasilacze przeważnie umieszczone są w ziemi. Sieć trakcyjna jest podzielona na odcinki zasilania, dzięki czemu możliwe jest wyłączenie zasilania fragmentu sieci przy zachowaniu zasilania pozostałej części.

Z punktu widzenia struktury przestrzennej można wyróżnić trzy systemy zasilania komunikacji tramwajowej i trolejbusowej (rys. 2, 3, 4):

- 1) zasilanie centralne

efficiency of production and distribution of energy in the public grid. However, based on operational experience, energy transmission losses in the overhead line can reach values as high as 30%, and a badly designed power supply system can significantly limit the utilisation of energy recovery. Matters such as spatial structure of the power supply system, sectioning of overhead line into supply parts, and the way these parts are supplied, are key issues in terms of minimising the energy consumption of public transport. The experts' community underestimates the significance of topology of the power supply system and its impact on the effective use of energy recovery. On numerous occasions, the super capacitor energy storage is presented as the only effective solution allowing for efficient utilisation of regenerative braking energy, and using it in other vehicles is marginalised.

### **3. POWER SUPPLY STRUCTURE OF URBAN ELECTRIC TRACTION**

Trams and trolleybuses are powered with direct current from the external overhead contact line. The energy supplying the urban traction comes from the public energy grid with high voltage alternating current and is subjected to conversion into direct current in traction substations, where also the value of voltage is lowered. After its converted and rectified, the energy from traction substations is delivered to power supply points of traction networks through power cables, also called feeders. For aesthetic purposes, feeders are usually placed in the ground. Traction network is divided into supply sections which allows for shutting the supply to a certain part of the network, leaving the rest of the network functional.

From a spatial structure perspective, we can distinguish three power supply systems in tram and trolleybus communication (fig. 2, 3, 4):

- 1) centralised power supply
- 2) one-sided decentralised power supply
- 3) double-sided decentralised power supply

Centralised power supply originated at the beginning of urban electric traction, when the emerging at the time tram networks were powered by one, central power station (mostly steam power plants, sometimes hydroelectric power plant). Development of public energy system contributed to the widespread of traction substations powered by alternating current energy network, which converts it to direct current which then is delivered to traction network. Traction substations, which were built at the beginning of the 1960s, were equipped in mercury rectifiers which meant high construction costs and the necessity to provide a 24 hours service. Thus, the goal was to minimise the number of substations through the maximum increase of supply areas.

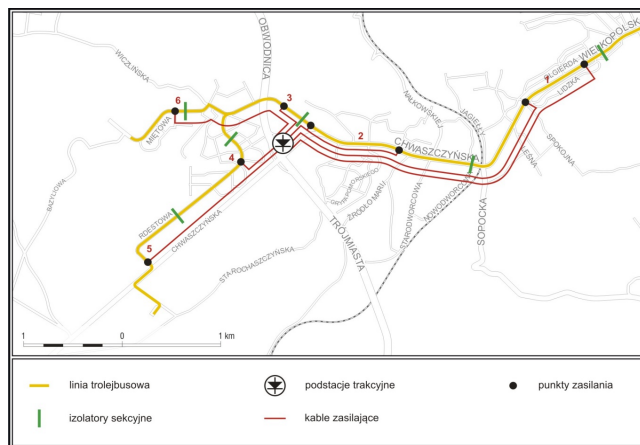
- 2) zasilanie zdecentralizowane jednostronne
- 3) zasilanie zdecentralizowane dwustronne.

Zasilanie centralne ma swą genezę w początkach miejskiej trakcji elektrycznej, gdy powstające wówczas sieci tramwajowe zasilane były z jednej, centralnej elektrowni (najczęściej parowej, czasem wodnej). Rozwój publicznych systemów energetycznych przyczynił się do rozpowszechnienia podstacji trakcyjnych zasilanych z sieci energetycznej prądu przemiennego i przetwarzającej ją na prąd stały, który był doprowadzany do sieci trakcyjnej. Podstacje trakcyjne, które były budowane do lat sześćdziesiątych XX wieku wyposażane były w rzęciowe prostowniki, co wiązało się z wysokimi kosztami budowy i koniecznością zapewnienia całodobowej obsługi. Dlatego dążono do minimalizacji liczby podstacji trakcyjnych przez maksymalne zwiększenie ich obszarów zasilania.

Cechą zasilania centralnego jest istnienie dużych podstacji (zasilających nawet 20 - 40 zasilaczy), które obejmują znaczne obszary zasilania a punkty zasilania są czasem bardzo oddalone od podstacji (rys. 2). Długości zasilaczy sięgają do 5 kilometrów długości, a ich przekroje wynoszą nawet 2000 mm<sup>2</sup>. Podstacje pracujące w układzie centralnym muszą zapewniać bezprzerwowe zasilanie, a co za tym idzie są zasilane dwoma liniami z sieci energetycznej oraz posiadają co najmniej dwa zespoły prostownikowe. W sieciach zasilanych centralnie stosuje się jednostronne zasilanie sieci trakcyjnej, czyli każdy odcinek zasilania jest zasilany tylko z jednej podstacji trakcyjnej.

Wynalezienie prostowników półprzewodnikowych oraz rozwój technologii prefabrykowanych stacji elektroenergetycznych przyczynił się do rozpowszechnienia się małogabarytowych podstacji trakcyjnych (rys. 3). Skutkiem tego zaczęto stosować zasilanie sieci trakcyjnej w układzie zdecentralizowanym, w którym podstacje są rozmieszczone gęsto (co 1 - 3 km), zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie punktów zasilania sieci trakcyjnej. Podstacje są jednozespolowe (posiadają 1 - 3 zasilacze), w licznych przypadkach są zasilane tylko jedną linią SN. Uszkodzenie się zespołu prostownikowego lub linii zasilającej powoduje wyłączenie całej podstacji, dlatego stosuje się rezerwowanie zasilania poprzez zasilanie z sąsiednich podstacji poprzez łączenie odcinków zasilania na sieci trakcyjnej.

Cechą zasilania centralnego jest istnienie dużych podstacji (zasilających nawet 20 - 40 zasilaczy), które obejmują znaczne obszary zasilania a punkty zasilania są czasem bardzo oddalone od podstacji (rys. 2). Długości zasilaczy sięgają do 5 kilometrów długości, a ich przekroje wynoszą nawet 2000 mm<sup>2</sup>. Podstacje pracujące w układzie centralnym muszą zapewniać bezprzerwowe zasilanie, a co za tym idzie są zasilane dwoma liniami z sieci energetycznej oraz posiadają co najmniej dwa zespoły prostownikowe. W sieciach zasilanych centralnie stosuje się jednostronne zasilanie



Rys. 2. Przykładowy fragment centralnego systemu zasilania sieci trakcyjnej

Fig. 2. Example of a central power supply system for traction network

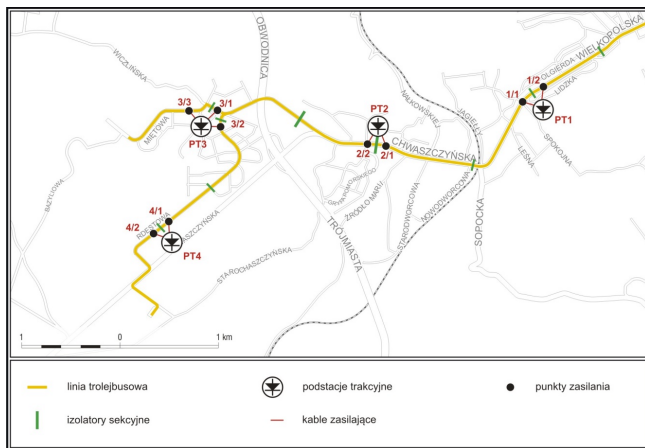
The main feature of central power supply is a large number of substations (powering even 20 - 40 feeders), which operate vast supply areas, and supply points are sometimes placed at a large distance from substation (fig. 2). The length of feeders reaches up to 5 kilometres, and their cross sections measure even 2000 mm<sup>2</sup>. Substations operating in the centralised system have to provide wireless supply, thus they are powered with two lines from energy network and have at least two rectifier units. In centrally powered networks, one-sided power supply of traction network is used, which means that each supply section is powered only by one traction substation.

The invention of semiconductor rectifier and the technological development of prefabricated power stations contributed to the widespread of small traction substations (fig. 3). As the result of this development, decentralised power supply system for traction network started being used, where substations are densely distributed (every 1 - 3 kilometres), located in direct proximity to power supply points of traction network. These are single-unit substations (they have 1 - 3 feeders), and quite often they are powered with only one medium voltage line. Damage of the rectifier unit or power supply line causes shut down of the whole substation, this is why a supply reservation is applied which uses supply from other substations by connecting the supply sections on the traction network.

In a standard power supply system, each section of traction network is powered by one substation. Technological advancement in the field of safety instrumented systems allowed dissemination of double-sided power supply of traction network (fig. 4), where sections of traction network can be powered by two or more substations. It allows for decreasing the voltage drops in traction network, and therefore, lowering energy

sieci trakcyjnej, czyli każdy odcinek zasilania jest zasilany tylko z jednej podstacji trakcyjnej.

Wynalezienie prostowników półprzewodnikowych oraz rozwój technologii prefabrykowanych stacji elektroenergetycznych przyczynił się do rozpowszechnienia się małogabarytowych podstacji trakcyjnych (rys. 3). Skutkiem tego zaczęto stosować zasilanie sieci trakcyjnej w układzie zdecentralizowanym, w którym podstacje są rozmieszczone gęsto (co 1 – 3 km), zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie punktów zasilania sieci trakcyjnej. Podstacje są jednozespołowe (posiadają 1 – 3 zasilacze), w licznych przypadkach są zasilane tylko jedną linią SN. Uszkodzenie się zespołu prostownikowego lub linii zasilającej powoduje wyłączenie całej podstacji, dlatego stosuje się rezerwowanie zasilania poprzez zasilanie z sąsiednich podstacji poprzez łączenie odcinków zasilania na sieci trakcyjnej.



Rys. 3. Przykładowy fragment sieci trakcyjnej zasilanej jednostronnie w sposób zdecentralizowany

Fig. 3. Example of traction network powered by one-sided decentralised system

W klasycznym układzie zasilania każdy odcinek sieci trakcyjnej jest zasilany z jednej podstacji. Postęp techniczny w obszarze układów teleautomatyki i techniki zabezpieczeniowej umożliwił rozpowszechnienie się dwustronnego zasilania sieci trakcyjnej (rys. 4), w którym odcinki sieci trakcyjnej mogą być zasilane z dwóch lub więcej różnych podstacji. Umożliwia to zmniejszenie spadków napięcia w sieci trakcyjnej, a co za tym idzie, strat przesyłowych energii. Co więcej, dwustronne zasilanie stwarza lepsze warunki dla rekuiperacji energii elektrycznej.

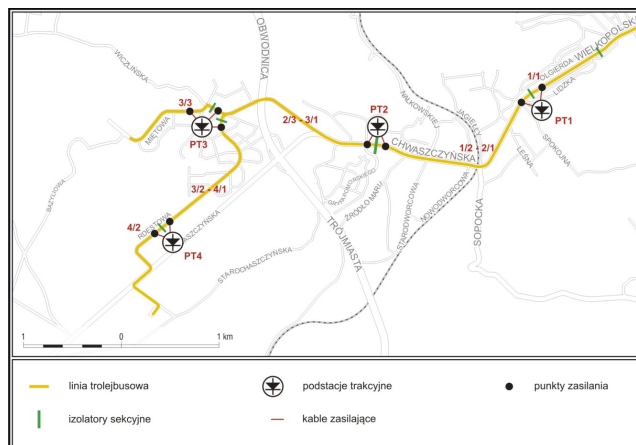
W istniejących centralnych systemach zasilania także jest możliwe wprowadzenie zasilania dwustronnego w ramach obszaru zasilania jednej podstacji. W takim przypadku odcinek zasilania jest zasilany za pomocą dwóch różnych zasilaczy danej podstacji. Przykład takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 5.

Porównanie przedstawionych trzech systemów zasilania sieci trakcyjnej będzie przedmiotem dalszej części artykułu.

transmission losses. Moreover, double-sided power supply creates better conditions for electricity recovery.

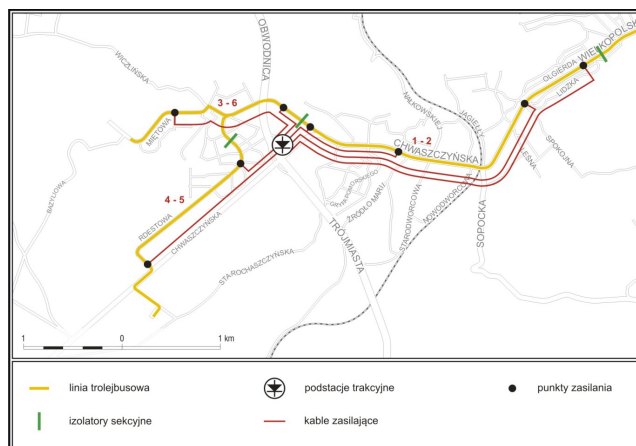
In the existing centralised power supply systems it is also possible to introduce double-sided power supply within the supply area of one substation. In such case, the supply section is powered with two different feeders of given substation. The example of such solution is shown on fig. 5.

Comparison of the three presented power supply system for traction network will be the subject of the next part of this article.



Rys. 4. Przykładowy fragment sieci trakcyjnej zasilanej dwustronnie w sposób zdecentralizowany

Fig. 4. Example of traction network powered by double-sided decentralised system



Rys. 5. Przykładowy fragment sieci trakcyjnej zasilanej dwustronnie w sposób centralny

Fig. 5. Example of traction network powered by double-sided centralised system

#### 4. POWER SUPPLY SYSTEM FOR TRACTION NETWORK AND USING RECOVERED ENERGY.

Trams and trolleybuses are powered with direct current from the external overhead contact line. The energy supplying the urban traction comes from

#### 4. UKŁAD ZASILANIA SIECI TRAKCYJNEJ A WYKORZYSTANIE ENERGII REKUPERACJI

Tramwaje i trolejbusy są zasilane prądem stałym z napowietrznej sieci trakcyjnej. Energia dla celów zasilania trakcji miejskiej jest pobierana z publicznej sieci energetycznej wysokiego napięcia prądu przemiennego i ulega przekształceniu na prąd stały w podstacjach trakcyjnych, gdzie także następuje obniżenie wartości napięcia. Po transformacji i wyprostowaniu energia z podstacji trakcyjnych doprowadzana jest do punktów zasilania sieci trakcyjnych za pomocą kabli zasilających, tzw. zasilaczy. Ze względów estetycznych zasilacze przeważnie umieszczone są w ziemi. Sieć trakcyjna jest podzielona na odcinki zasilania, dzięki czemu możliwe jest wyłączenie zasilania fragmentu sieci przy zachowaniu zasilania pozostałej części. Cechą każdej maszyny elektrycznej jest możliwość pracy w dwóch kierunkach przepływu energii. W przypadku silników trakcyjnych oznacza to możliwość pracy prądnicowej w trakcie hamowania pojazdu, polegającej na zamianie energii kinetycznej pojazdu w energię elektryczną, skutkiem czego wytwarzany jest moment hamujący. Energia ta początkowo wytracana była w rezystorach hamowania znajdujących się w pojeździe. Rozwój konstrukcji napędów elektrycznych, a przede wszystkim półprzewodnikowych wielkiej mocy spowodowało rozpowszechnienie się rekuperacji w tramwajach i trolejbusach. Polega ona na odzyskiwaniu energii elektrycznej podczas hamowania pojazdu i ponownym jej wykorzystaniu.

Istotnym zagadnieniem jest zapewnienie warunków dla wykorzystania energii elektrycznej powstającej podczas hamowania. W klasycznym układzie zasilania, w którym podstacje nie są wyposażone w urządzenia akumulujące energię, przepływ prądu hamowania rekuperacyjnego może odbywać się w dwojaki sposób:

1) na drodze pojazd – sieć trakcyjna – pojazd, gdy pojazd hamujący i ruszający znajdują się na jednym odcinku zasilania,

2) na drodze pojazd – sieć trakcyjna – zasilacz – szyny zbiorcze podstacji trakcyjnej – zasilacz – sieć trakcyjna – pojazd, gdy pojazdy znajdują się na dwóch odcinkach zasilania.

W obu przypadkach energia rekuperacji jest absorbowana przez drugi pojazd znajdujący się na odcinku zasilania, który jest w stanie przyjąć energię, czyli znajduje się w ruchu. Jednak w częstych sytuacjach w obszarze zasilania nie ma pojazdów zdolnych do absorpcji energii, wówczas energia rekuperacji wytracana jest w rezystorach hamowania. Skutkiem tego jest niepełne wykorzystanie potencjału możliwości rekuperacji.

the public energy grid with high voltage alternating current and is subjected to conversion into direct current in traction substations, where also the value of voltage is lowered. After its converted and rectified, the energy from traction substations is delivered to power supply points of traction networks through power cables, also called feeders. For aesthetic purposes, feeders are usually placed in the ground. Traction network is divided into supply sections which allows for shutting the supply to a certain part of the network,

leaving the rest of the network functional. Each electric machine has the opportunity to operate in two directions of energy flow. In case of traction motor, it means the possibility of a generator to operate during braking of the vehicle, which changes the kinetic energy of vehicle into electricity which results in producing the braking torque. Initially, this energy was released in brake resistors of the vehicle. The advancement of electric drive construction, and especially the development of semiconductor drives of high voltage, resulted in the widespread of energy recovery in trams and trolleybuses. Energy recovery system recovers electricity during vehicle braking and reuses it, this process is called regenerative braking.

Providing conditions for reusing the energy recovered during braking is a very important issue. In the traditional power supply system, where substations are equipped in devices which accumulate energy, the transmission of regenerative braking electricity can occur in two ways:

1) In the vehicle - traction network - vehicle exchange, when a braking vehicle and a starting vehicle are present on the same supply section,

2) In the vehicle - traction network - feeder - busbars in traction substation - feeder - traction network - vehicle exchange, when vehicles are on two different supply sections.

In both cases, the recovered energy is absorbed by another vehicle on the supply section which is able to receive the energy, meaning it is in motion. However on many occasions, there are no vehicles within the supply section which are able to absorb the energy, which means that the recovered energy is released in the brake resistors. This results in limited utilisation of energy recovery potential.

#### 5. THE SIGNIFICANCE OF SPATIAL STRUCTURE OF POWER SUPPLY SYSTEM

Spatial structure of power supply system of traction network impact two aspects of energy consumption:

- 1) energy transmission losses in traction network,
- 2) the level of utilisation of the regenerative braking.

## 5. ZNACZENIE STRUKTURY PRZESTRZENNEJ UKŁADU ZASILANIA

Struktura przestrzenna systemu zasilania sieci trakcyjnej wpływa na dwa aspekty zużycia energii:

- 1) straty przesyłu energii w sieci trakcyjnej,
- 2) stopień wykorzystania hamowania odzyskowego.

Straty przesyłowe są zależne od rezystancji przewodnika, czyli kabli zasilających i sieci trakcyjnej. Te zależą zaś od ich długości. Wzrost odległości między podstacjami, wzrost długości kabli zasilających powoduje wzrost strat przesyłowych. Skutkiem tego straty przesyłowe w przypadku centralnego zasilania sieci trakcyjnej, w których konieczne jest dostarczanie energii do punktów zasilania znacznie oddalonych od podstacji trakcyjnych, są większe niż w przypadku decentralizowanych układów zasilania. Znacznym źródłem rozpraszania energii w centralnych układach zasilania są straty w długich kablach zasilających, których długości mogą być nawet rzędu kilku kilometrów.

Struktura przestrzenna układu zasilania wpływa na efektywność odzysku energii hamowania. Z punktu widzenia efektywności rekuperacji istotne jest zapewnienie jak największej liczby potencjalnych odbiorców rekuperowanej energii (innych poruszających się pojazdów) oraz możliwych dróg przepływu energii generowanej podczas hamowania, co powoduje zwiększenie prawdopodobieństwa znalezienia odbiorcy dla rekuperowanej energii.

Można stwierdzić, iż z punktu widzenia minimalizacji strat przesyłowych korzystniejsze są zdecentralizowane układy zasilania, w których odległości między podstacjami są mniejsze. Wynikające stąd straty przesyłu energii są mniejsze. Z drugiej zaś strony, rozległe obszary zasilania w systemach zasilania centralnego stwarzają znacznie lepsze warunki dla powtórnego wykorzystania energii hamowania. Rozwiązaniem pozwalającym pokonać tę sprzeczność, łączącym zalety centralnego i zdecentralizowanego systemu zasilania z jednostronnym zasilaniem jest dwustronne zasilanie sieci trakcyjnej (rys. 4). Dzięki małym odległościom między podstacjami i długościom kabli zasilających, straty przesyłu energii są niskie, natomiast połączenie ze sobą obszarów zasilania poszczególnych podstacji powiększa obszar na którym może przepływać energia rekuperacji i zwiększa liczbę potencjalnych jej odbiorców.

## 6. ANALIZA PORÓWNAWCZA UKŁADÓW ZASILANIA TRAKCJI MIEJSKIEJ

Tramwaje i trolejbusy są szeroko rozpowszechnionym środkiem transportu miejskiego w Europie. Odmiennie uwarunkowania historyczne, techniczne i ekonomiczne w poszczególnych krajach skutkują występowaniem różnych rozwiązań w zakresie układów zasilania elektrycznych środków transportu miejskiego. Uwidacznia się to między innymi w odmiennych

Energy transmission losses depend on resistance in conductor, namely power supply cables and traction network. This depends on their length. Increased distance between substations and increased supply cable length causes the increase of energy transmission losses. As a result, energy transmission losses in centralised power supply of traction network, where it is necessary to deliver the energy to supply points placed at a large distance from substations, are higher than in the case of decentralised power supply systems. The major source of energy dispersal in centralised power supply systems, are losses in long supply cables, which can be even a few kilometres long.

Spatial structure of power supply system impact the efficiency of regenerative braking. From the efficiency and energy recovery point of view, it is important to ensure the highest possible number of potential receivers of the recovered energy (other vehicles in motion), and increasing the possible ways of transmitting the energy generated during braking, which in turn increases the probability of finding a receiver of the recovered energy.

It could be claimed, that, from the energy transmission losses point of view, decentralised power supply systems are more beneficial, due to shorter distances between substations. Energy transmission losses occurring here are lower. On the other hand, however, vast supply areas in centralised power supply systems create much better conditions for reusing the energy of regenerative braking. The solution allowing for overcoming this contradiction, and combining the advantages of centralised and one-sided decentralised power supply system, is double-sided power supply system for traction network (fig. 4). Thanks to short distances between substations and the length of the supply cables, energy transmission losses are low, while connecting supply sections of each substations expands the area where the recovered energy can be transmitted and increases the number of its potential receivers.

## 6. COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER SUPPLY SYSTEMS FOR URBAN TRACTION

Trams and trolleybuses are a widespread mean of city transportation in Europe. Different historical background, or technical and economic circumstances of certain countries result in the presence of different solutions in terms of electric power supply systems of urban transport. It is prominent in many aspects, including varied structures of power supply systems. For the former Eastern bloc countries (Poland, Czech Republic, Slovakia, the countries of former USSR) it is typical to use centralised power supply systems, while most tram

strukturach układów zasilania. Dla krajów byłego bloku wschodniego (Polska, Republika Czeska, Słowacja, kraje byłego ZSRR) charakterystyczne są układy zasilania centralnego, natomiast w Europie Zachodniej większość sieci tramwajowych i trolejbusowych jest zasilania w sposób zdecentralizowany. Bardzo widoczne jest rozpowszechnienie się zasobników energii elektrycznej, jednak ich zastosowanie jest różne w poszczególnych miastach. Z tego powodu uzasadnione staje się wykonanie analizy porównawczej różnych wariantów zasilania sieci trakcyjnej.

Analiza porównawcza zostanie wykonana na przykładzie fragmentu sieci trolejbusowej w Gdyni (Polska). Obiektem analizy będzie obszar zasilania podstacji trakcyjnej Chwaszczyńska. Podstacja ta zasilą obszar miasta o charakterze pagórkowatym, co sprzyja zwiększonemu wykorzystaniu hamowania odzyskowego. Porównane zostaną trzy warianty układu zasilania:

- wariant I: obszar zasilania podstacji Chwaszczyńska (rys. 2) w centralnym układzie. Układ ten funkcjonował do 2010 roku,

3 warianty modyfikacji układu zasilania:

- wariant II: obszar zasilania podstacji Chwaszczyńska (rys. 5) w centralnym układzie z zastosowaniem zasilania dwustronnego. Powstał z wariantu I poprzez połączenie ze sobą w pary odcinków 1 i 2, 3 i 6, 4 i 5,

- wariant III: w układzie z zasilaniem zdecentralizowanym jednostronnym za pomocą czterech podstacji trakcyjnych (rys. 3),

- wariant IV: w układzie z zasilaniem zdecentralizowanym dwustronnym (rys. 4). Powstał z wariantu III poprzez połączenie ze sobą w pary odcinków 1/2 i 2/1, 2/3 i 3/1, 3/2 i 4/1.

W oparciu o metodę symulacyjną Monte Carlo przeprowadzono obliczenia energetyczne układu zasilania podstacji Chwaszczyńska w trzech przedstawionych wariantach. Symulację przeprowadzono na bazie rzeczywistych (maj 2014) rozkładów jazdy trolejbusów, a więc założono, że na analizowanym obszarze funkcjonuje pięć linii o numerach: 23, 24, 27, 29 i 31. Do obliczeń przyjęto również założenie, iż wszystkie linie trolejbusowe będą obsługiwane trolejbusami Solaris Trollino 12, wyposażonymi w układ napędowy z silnikiem asynchronicznym o mocy 175 kW i posiadającymi możliwość techniczną hamowania odzyskowego do sieci trakcyjnej. Profil prędkości oparto o aktualne rozkłady jazdy oraz drogowe ograniczenia prędkości. W tabeli 2 przedstawiono porównanie parametrów energetycznych – ekonomicznych poszczególnych trzech wariantów zasilania sieci trakcyjnej. Rysunek 6 przedstawia godzinne straty przesyłu energii w sieci trakcyjnej oraz odzysk energii hamowania w analizowanym obszarze zasilania. Zaznaczono także maksymalny potencjał generacji energii hamowania odzyskowego.

and trolleybus networks in Western Europe is powered in a decentralised way. The presence of electricity storage devices is increasingly common, but their use varies depending on a city. That is why it seems appropriate to conduct a comparative analysis of different options in power supply for traction network.

This comparative analysis is conducted on the example of a fragment of trolleybus network in Gdynia (Poland). The subject of this analysis is the supply section of the Chwaszczyńska substation. This substation powers a hilly area of the city, which leads to greater use of regenerative braking. Three power supply options will be looked at:

- option I: supply section of the Chwaszczyńska substation (fig. 2) in centralised system. This system functioned until the year of 2010,

3 options for modification for the power supply system:

- option II: supply section of the Chwaszczyńska substation (fig. 5) in a double-sided centralised power supply system. It was created from option I, by pairing the following sections: 1 and 2, 3 and 6, 4 and 5,

- option III: in a one-sided decentralised system with the use of four traction substations (fig. 3),

- option IV: in a double-sided decentralised power supply system (fig. 4). It was created from option III by pairing the following sections: 1/2 and 2/1, 2/3 and 3/1, 3/2 and 4/1.

Based on the Monte Carlo simulation method, energy calculations for the power supply system of the Chwaszczyńska substation in the three options were carried out. The simulation was carried out on the basis of actual (May 2014) timetables for trolleybuses, therefore it was assumed that buses of the following line numbers operated in the analysed area: 23, 24, 27, 29 and 31. In the calculations it was also assumed that all of the trolleybus lines are serviced by the Solaris Trollino 12 trolleybuses, equipped in the drive system with induction motor with the output of 175 kW and technical capacity for regenerative braking for traction network. The average speed was based on recent timetable and road speed limits. Table 2 presents the comparison of energy and economic parameters of each of the options for traction network power supply. Figure 6 shows hourly energy transmission losses in traction network and energy recovery from regenerative braking in the analysed supply area. The maximum regenerative braking potential was also noted.

The conducted simulations confirmed the characteristics centralised and decentralised power supply systems specified in chapters 3 – 5. Energy transmission losses in supply network are much higher in the centralised system.



**Tab. 2. Porównanie trzech wariantów zasilania sieci trolejbusowej**

**Table 2. Comparison of three power supply options for trolleybus network**

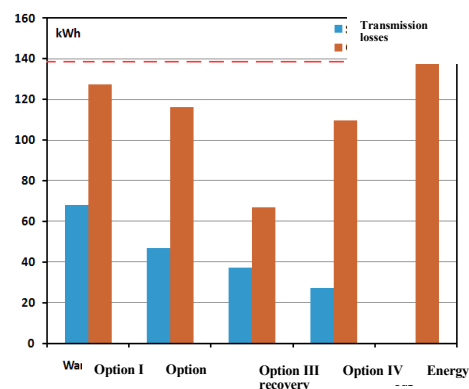
Wariant układu zasilania/ Supply system variant	Łączne godzinowe zużycie energii/ Energy consumption per hour	Odzysk energii hamowania /Brake energy recuperation	Wykorzystanie potencjału hamowania odzyskowego /Using of possible brake energy	Straty przesyłania energii /Losses of energy transmission
Wariant/ Variant I	309 kWh	35 %	92 %	19 %
Wariant/ Variant II	289 kWh	32 %	84 %	13 %
Wariant/ Variant III	348 kWh	18 %	48 %	10 %
Wariant/ Variant IV	287 kWh	30 %	79 %	7 %

Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdzają cechy centralnego i zdecentralizowanego układu zasilania wyszczególnione w rozdziałach 3 – 5. Straty przesyłu energii w sieci zasilającej są znacznie wyższe w układzie centralnym. Należy zwrócić uwagę na ich wysoką wartość, wynoszącą blisko 20% w układzie zasilania centralnego (tabl. 2). Jednak te straty są rekompensowane lepszym wykorzystaniem odzysku energii podczas hamowania (rys. 6), skutkiem czego całkowite zużycie energii w wariantcie I jest mniejsze niż w wariantcie III. Zgodnie z oczekiwaniami, zasilanie dwustronne łączy w sobie zalety układu centralnego i zdecentralizowanego. Straty przesyłowe w wariantcie IV są najmniejsze, natomiast stopień wykorzystania rekuperacji jest bliski jak w układzie centralnym. Bardzo dobrą efektywność energetyczną przedstawia także wariant II. Zwraca uwagę mniejszy stopień wykorzystania rekuperacji niż w wariantcie I, co może wydawać się irracjonalne. Jest to spowodowane mniejszymi stratami przesyłu w wariantcie II. W wariantcie I energia zwracana do sieci trakcyjnej jest większa, jednak znaczna jej część jest tracona podczas przepływu zasilaczami pomiędzy poszczególnymi odcinkami zasilania. W wariantcie II straty przesyłu są znacznie mniejsze.

Na rysunku 6 zaznaczono także maksymalny do uzyskania potencjał odzysku energii hamowania. Należy zwrócić uwagę, iż odpowiednia topologia układu zasilania umożliwia wykorzystanie ponad 80% energii generowanej podczas hamowania. Zatem, w wielu przypadkach zapewnienie właściwej struktury przestrzennej układu zasilania może przynieść efektywność rekuperacji zbliżoną do zasobników, przy znacznie mniejszych kosztach inwestycyjnych.

## 7. POMIAROWE OKREŚLENIE POTENCJAŁU DALSZEGO OGRANICZENIA ZUŻYCIA ENERGII

Podczas wykonywania badań pracy układów zasilania kluczowym elementem jest wybór odpowiedniej metody przeprowadzenia pomiarów. Jednym ze sposobów jest wykonanie ich w trakcie próbnych jazd bez pasażerów. Taka metoda jest stosunkowo łatwa i w krótkim czasie umożliwia uzyskanie wyników.



**Fig. 6. Comparison of energy recovery and transmission losses in each power supply options**

**Rys. 6. Porównanie odzysku energii i strat przesyłowych w poszczególnych wariantach zasilania**

The high value of these losses, reaching nearly 20% in the centralised power supply system, is worth noting (table 2). However these losses are compensated by better use of energy recover during braking (fig. 6), which results in total energy consumption being lower in option I than in option III. As expected, double-side power supply combines the advantages of centralised and decentralised systems. Transmission losses in option IV are the lowest, while the level of using the recovered energy is close to that one in centralised system. Option II also shows a very good energy efficiency. Worth noting is the lower level of using the recovered energy in option I, which can seem irrational. It is caused by a lower value of transmission losses in option II. In option I, energy returned to the traction network is higher, however a great deal of it is lost during transmission through feeders between each supply sections. In option II, transmission losses are much lower.

The maximum energy recovery potential is indicated on figure 6. Worth noting is the fact that the appropriate topology of power supply system allows for using over 80% of the energy generated during braking. Hence, in many cases, ensuring appropriate spatial structure of power supply system can result in the efficiency of energy recovery close to that one of energy storage, but with much lower investment costs.

## 7. MEASUREMENTS OF THE POTENTIAL FURTHER ENERGY CONSUMPTION MITIGATION

The key step during the study of power supply system operation, is choosing the right method to carry out measurements. One way of doing so, is during test drives, without passengers. This method is relatively easy and allows for obtaining results in a short period of time.

Jednak podstawową jej wadą jest wykonywanie pomiarów w warunkach odbiegających od rzeczywistych warunkach występujących w ruchu miejskim. Ze względu na wpływ warunków zewnętrznych charakterystyczna jest niska powtarzalność pomiarów, efektem czego konieczne jest wielokrotne powtórzenie eksperymentu, co w praktycznych warunkach jest trudne. Kolejnym utrudnieniem jest zmienność warunków pogodowych mająca zasadniczy wpływ na zużycie energii, co stwarza konieczność dodatkowego powtarzania pomiarów. Co więcej, psychologiczne warunki pracy kierowcy podczas jazd testowych są inne od warunków panujących podczas jazdy z pasażerami. Odzwierciedla się to w technice jazdy, która może być nieadekwatna w stosunku do warunków realnych. Dlatego też konieczne staje się przeprowadzenie pomiarów w normalnych warunkach pracy pojazdów, czyli przy jeździe z pasażerami w ruchu liniowym.

Istotnym zagadnieniem jest wybór mierzonej wartości, która stanowi podstawę do oceny efektywności hamowania rekuperacyjnego. Analizę oparto na względnym czasie załączenia rezystora hamowania w pojazdach na obszarach zasilania poszczególnych podstacji, indikator ten określono na podstawie pomiarów przeprowadzonych w pojazdach. Jest on miarą niewykorzystanego potencjału rekuperacji – załączenie rezystora hamowania świadczy o braku odbioru dla generowanej energii, a co za tym idzie, niesie informacje o możliwości dalszego zwiększenia efektywności energetycznej.

W latach 2011-2013 przeprowadzono pomiary w gdyńskim układzie zasilania. Wykonano je na podstacjach trakcyjnych oraz w trolejbusach. Dla celów pomiarowych wykorzystano pokładowy system rejestracji poboru zużytej energii wraz z zapisem położenia GPS w czasie, w który wyposażone są pojazdy eksploatowane w Gdyni. Pozwala to na określenie precyzyjnego zużycia energii na poszczególnych odcinkach zasilania. Wyniki obliczeń oparto na pomiarach przeprowadzonych w okresie grudzień 2011 – listopad 2012, przy czym jako okres zimowy przyjęto miesiące styczeń – luty, a jako okres letni lipiec – sierpień.

Rezultatem prac badawczych była analiza przestrzennego charakteru hamowania odzyskowego. W tym celu zbadano względny czas załączenia rezystora hamowania odzyskowego w poszczególnych punktach sieci trakcyjnej. Wyniki tej analizy przedstawiono na rysunku 7, gdzie ukazano mapę intensywności hamowania oporowego. Intensywność koloru oraz grubość linii zależne są od względnego czasu załączenia hamowania oporowego. Pierwsza część numeru odcinka zasilania oznacza numer podstacji, druga oznacza numer kolejny odcinka w obszarze zasilania danej podstacji. W tabl. 3 przedstawiono porównanie parametrów energetyczno - ruchowych podstacji trakcyjnych. Numeracja podstacji w tabl. 3 odpowiada numeracji na rys. 7.

However its basic disadvantage is carry out measurements in conditions which are different from actual conditions occurring during city traffic. Due to the impact of external conditions, it is unlikely to achieve repeatability in measuring, hence it is necessary to repeat the experiment multiple times, which is difficult in the actual conditions. Another difficulty is posed by the changeability of weather conditions which have a great impact on energy consumption, hence it is necessary to carry out additional repeated measurements. Moreover, psychological work conditions of the driver during a test drive are different to those during drive with passengers. It is reflected in driving technique, which can be inadequate to actual conditions. This is why, it is also important to carry out measurements during normal operational conditions of the vehicle, meaning a drive with passengers along the line's route.

A very important issue is choosing the value being measured, which constitutes a basis to evaluate the efficiency of regenerative braking. The analysis was based on the relative starting time of brake resistor in the vehicles in the supply areas of each substations. This indicator was determined based on the measurements carried out in the vehicles. It is the measure of unused energy recovery potential - starting of the brake resistor indicates the absence of transmission for the generated energy, therefore it carries information on the possibility of further improvement of energy efficiency.

In the years of 2011-2013 measurements were carried out in Gdynia's power supply system. They were carried out on traction substations and in trolleybuses. For the measuring purposes, an on-board measuring system of used energy with GPS was used, which the vehicles operating in Gdynia are equipped with. It allows for precise determination of energy consumption on specific supply sections. The calculation result was based on the measurements carried out in the period between December 2011 and November 2012, where as the winter period the months of January - February were considered, whereas July - August were described as summer period.

The result of the research work was an analysis of spatial characteristics of regenerative braking. In order to conduct this analysis, the relative start-up time of regenerative brake resistor was studied in specific points of traction network. The results of this analysis are presented on figure 7, where a map of intensity of the resistor breaking is presented. The colour intensity and line thickness depend on the relative start-up time of the resistance brake. The first part of the number of supply section is the number of substation, second part is the number of the next section in the supply area of specific substation. Table 3 presents a comparison of energy-motion parameters of traction substations.

**Tab. 3. Porównanie parametrów poszczególnych podstacji**  
**Table 3. Comparison of parameters of specific substations**

Nr podstacji /Substation no.	Podstacja /Substation	Liczba zasilaczy/Number of feeders	Liczba zespołów prostownikowych /Number of rectifier units	Średnia liczba pojazdów w obszarze zasilania /Average amount of vehicles in supply area	Średni dzienny pobór energii w lecie /Average daily energy consumption [MWh]
1	<i>Północna</i>	6	2	14,2	4,5
2	<i>Grabówek</i>	4	2	8,6	4,6
3	<i>Plac Konstytucji</i>	3	1	7,5	2,0
4	<i>Wendy</i>	3	1	10,2	3,3
5	<i>Kielecka</i>	3	2	4,2	2,7
6	<i>Redłowo</i>	3	2	8,7	4,5
7	<i>Sopot I</i>	2	1	1,5	0,7
8	<i>Sopot II</i>	1	1	1,2	0,3
9	<i>Wielkopolska</i>	1	1	2,6	1,1
10	<i>Chwaszczyńska</i>	5	2	11,3	4,3

W pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na większe wykorzystanie energii hamowania odzyskowego (mniejszy względny czas załączenia rezystora hamowania) w miesiącach zimowych lub letnich. Jest to efekt większego zużycia energii w zimie, co stwarza lepsze warunki dla przepływu energii hamowania odzyskowego na drodze pojazd – pojazd. Jednak kluczowym wnioskiem jest przestrzenne zróżnicowanie charakteru hamowania odzyskowego. Widoczne jest słabe wykorzystanie odzysku energii w przypadku podstacji Wielkopolska (nr 9), Sopot I (nr 7) i Sopot II (nr 8). Jest ono wynikiem małej intensywności ruchu w obszarach zasilania przedmiotowych podstacji oraz górskiego charakteru podstacji Wielkopolska. Są to trzy podstacje trakcyjne o najmniejszej intensywności ruchu (tab. 3) Należy zauważyć, iż na odcinku zasilania 9/1 hamowanie oporowe występuje w zachodniej jego części, na której jest stromy podjazd. We wschodnim, płaskim, fragmencie hamowanie rezystorowe jest o wiele mniej widoczne.

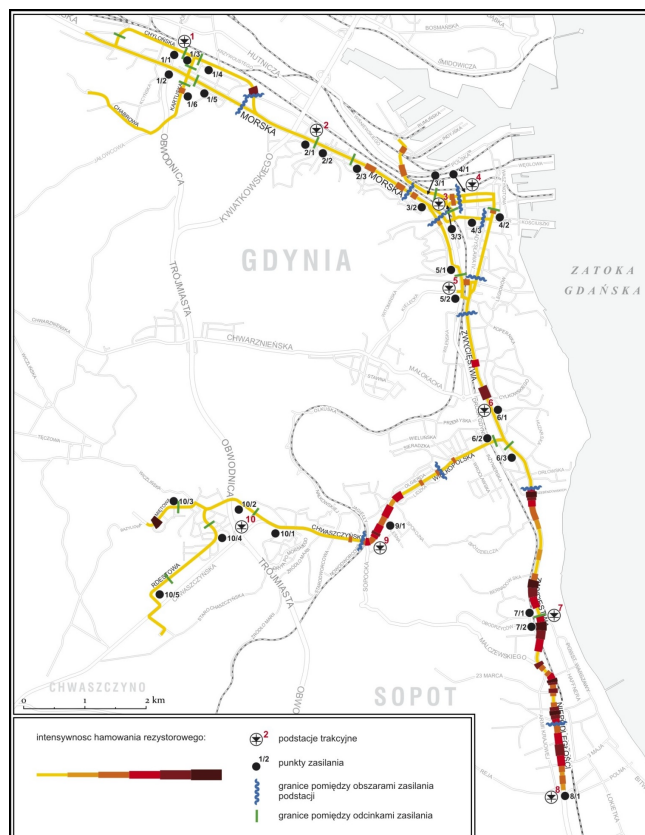
W przypadku pozostałych podstacji obszary w których występuje hamowanie do rezystora są znacznie mniejsze, co świadczy o dużo lepszym wykorzystaniu odzysku energii. Istotnym spostrzeżeniem jest znaczna zależność między przestrzennym charakterem miejsc hamowania rezystorowego a czynnikami wpływającymi na ruch drogowy. Mniejsza natomiast jest zależność między przestrzennym charakterem miejsc hamowania rezystorowego a parametrami elektrycznymi obszaru zasilania. Pierwsza zależność wyraża się pokrywaniem miejsc w których praca rezystora hamowania jest częstsza z obszarami o ciężkich warunkach ruchu drogowego, czyli głównie skrzyżowaniami. Na rysunku 7 obszary częstego hamowania oporowego mają charakter punktowy i są zbieżne z lokalizacją głównych skrzyżowań w mieście. Jest to wynikiem częstego hamowania w tych miejscach, co skutkuje także większym prawdopodobieństwem wystąpienia hamowania do rezystora. W trakcie hamowania odzyskowego na drodze pojazd – pojazd energia przepływa przez sieć trakcyjną. Sieć ta charakteryzuje się rezystancją jednostkową, która stanowi opór dla przepływu prądu elektrycznego i utrudnia odzysk energii hamo-

Numbers of substations in table 3 corresponds with the numbers on fig. 7.

First of all, attention should be given to the higher use of energy recovered from regenerative braking (lower relative start-up time of brake resistor) in winter months rather than in summer months. This is an effect of a higher energy use in winter, which creates better condition for the transmission of regenerative braking energy in the vehicle - vehicle exchange. However, the key finding is the spatial variation in the characteristic of regenerative braking. We can see a poor use of energy recovery in cases of the following substations: Wielkopolska (no. 9), Sopot I (no. 7) i Sopot II (no. 8).. It is a result of a low intensity of traffic in the supply areas of this substations, and the hilly character of the Wielkopolska substation. These are the three traction substations with the lowest traffic intensity (table 3). It must be noted, that in the supply section number 9/1, the resistor braking occurs in its western part, where there is a steep uphill road. In the flat eastern part, the resistor braking is far less prominent.

In case of other substations, the number of areas where resistor braking occurs is far lesser which means that recovery energy is in a better use. A significant observation to note, is a strong correlation between spatial character of locations of resistor braking, and factors impacting the road traffic. Far less prominent is the correlation between spatial character of locations of resistor braking and electric parameters of supply area. The first correlation is expressed in overlapping of places where operation of braking resistor is frequent, with the areas of difficult road traffic conditions, mainly intersections. On the figure 7, places of frequent resistor braking have a character of small specific point and correspond with the location of main intersections in the city, It is a result of frequent braking in these places, which result in higher probability of resistor braking. During regenerative braking in the vehicle - vehicle exchange, the energy is

wania. W związku z tym należałoby spodziewać się, iż wraz ze wzrostem odległości od punktu zasilania warunki dla odzysku energii powinny być gorsze, a co za tym idzie, miejsca hamowania rezystorowego powinny być bardziej widoczne. Jednak przeprowadzona analiza nie pozwala na potwierdzenie tej hipotezy.



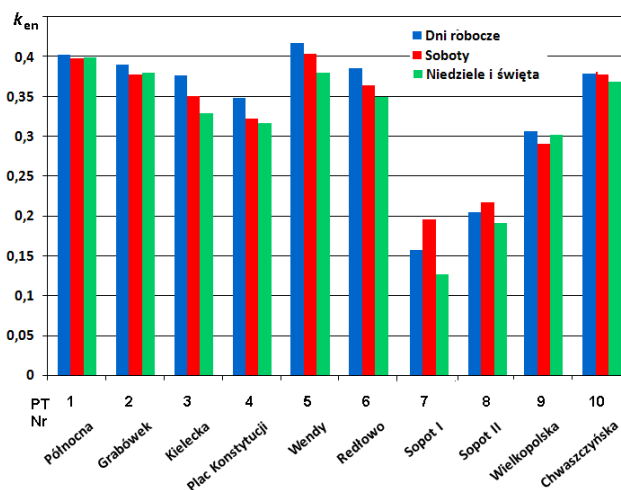
Rys. 7. Mapa intensywności hamowania rezystorowego w miesiącach zimowych.

Fig. 7. Map of resistor braking intensity in winter months.

Powyższa analiza pomiarowa nie jest jedyną pracą badawczą związaną z energochłonnością transportu zrealizowana w Gdyni. W 2012 roku PKT Gdynia przeprowadziło badania stopnia wykorzystania hamowania odzyskowego. Wyniki wykonanej analizy ściśle nawiązują do zagadnienia znaczenia struktury przestrzennej układu zasilania. Na rys. 8 zaprezentowana jest efektywność hamowania odzyskowego w obszarach zasilania poszczególnych podstacji, rys. 9 przedstawia zależność pomiędzy średnią liczbą trolejbusów poruszających się w obszarze zasilania podstacji a efektywnością odzysku energii. Pomiarów dokonano na napędzie trakcyjnym pojazdów. Zauważalny jest wzrost efektywności rekuperacji wraz ze wzrostem intensywności ruchu. W przypadku większości podstacji wykorzystanie odzysku energii jest na poziomie 30 – 40%. Można więc stwierdzić, znaczna część energii odzysku jest wykorzystana przez pozostałe pojazdy. Jedynie w przypadku trzech najmniej obciążonych podstacji (Sopot I, Sopot II, Wielkopolska) występuje niewykorzystanie energii hamowania, co jest potwierdzeniem wyników przedstawionych w pierwszej części artykułu.

being transmitted through traction network. This network is characterised by distributed unit resistance which creates a current resistance for electric current and impedes the recovery of braking energy. Therefore, it should be expected that along with the increase of the distance from supply point, conditions for energy recovery should deteriorate, and consequently, the places of resistor braking should be more prominent. However, the conducted analysis does not allow for the confirmation of this hypothesis.

The above measurement analysis is not the only research work related to energy consumption of transport implemented in Gdynia. In 2012, PKT Gdynia conducted a study of the degree of regenerative braking usage. Results of the analysis are closely related to the issue of the significance of spatial structure of power supply system. Fig. 8 presents the efficiency of regenerative braking in supply areas of specific substations, and fig. 9 shows the relation between average amount of trolleybuses operating in the supply area of substation and efficiency of energy recovery. Measures were carried out on the traction motor of vehicles. The increase of recovery efficiency alongside the increase of traffic intensity is observable. In case of most of the substation, usage of the recovered energy values at 30 - 40 %. It could be therefore stated that, majority of recovered energy is used by the other vehicles. Only in the case of three, the least frequented, substations (Sopot I, Sopot II, Wielkopolska), the energy recovered from braking is not used, which confirms the results presented in the first part of the article.



Rys. 8. Efektywność hamowania odzyskowego na obszarach zasilania poszczególnych podstacji.

Fig. 8. Efficiency of regenerative braking in supply areas of specific substations.

## 8. POMIAROWE OKREŚLENIE STRAT ENERGII W TROLEJBUSOWEJ SIECI TRAKCYJNEJ

Straty przesyłowe  $E_{straty}$  w układzie zasilania podczas dostarczania energii do pojazdu trakcyjnego powstają w zasilaczach oraz sieci trakcyjnej. Chwilowa ich wartość może być zdefiniowana jako różnica pomiędzy energią  $E_{poj}$  pobraną poprzez pojazd z sieci trakcyjnej a energią  $E_{PT}$  pobraną z podstacji trakcyjnej:

$$E_{straty} = E_{PT} - E_{poj} \quad (1)$$

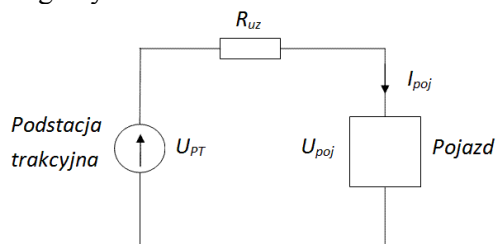
Zakładając brak rekuperacji do sieci trakcyjnej, cały prąd pojazdu  $I_{poj}$  musi być dostarczony z podstacji trakcyjnej. Dlatego powyższy wzór można przedstawić w oparciu o napięcie  $U_{poj}$  na odbierakach pojazdu i napięcie podstacji trakcyjnej  $U_{PT}$ :

$$E_{straty} = I_{poj} \cdot (U_{PT} - U_{poj}) \quad (2)$$

Odpowiadający temu schemat zastępczy przedstawiono na rys. 10. Względna wartość  $e$  strat przesyłowych może być określona jako:

$$e = I_{poj} \cdot \frac{(U_{PT} - U_{poj})}{U_{poj}} \quad (3)$$

Uśredniając w dziedzinie czasu powyższe wartości uzyskuje się średnie wartości strat przesyłowych w poszczególnych elementach układu zasilania.



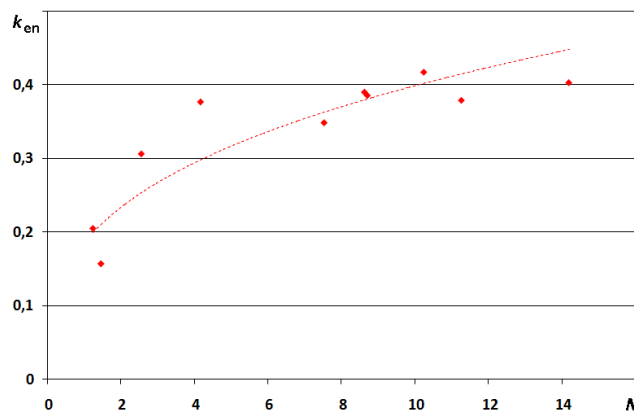
Rys. 10. Schemat zastępczy układu zasilania pojazdu trakcyjnego z podstacji trakcyjnej.

Fig. 10. Equivalent circuit of the power supply system for traction vehicle from traction substation.

W kwietniu 2012 roku przeprowadzono pomiary w gdyńskim układzie zasilania. Wykonano je na podstacjach trakcyjnych oraz w trolejbusach. Dla celów pomiarowych wykorzystano pokładowy system rejestracji poboru zużytej energii wraz z zapisem położenia GPS w czasie, w który wyposażone są pojazdy eksploatowane w Gdyni. Pozwala to na określenie precyzyjnego zużycia energii na poszczególnych odcinkach zasilania. Jako wartość napięcia  $U_{PT}$  podstacji przyjęto wartość oczekiwaną napięcia szyn zbiorczych rozdzielni prądu stałego. Na rys. 11 przedstawiono mapę strat przesyłowych z podziałem na poszczególne sekcje zasilania.

## 9. WNIOSKI

Zwiększenie efektywności wykorzystania hamowania odzyskowego jest możliwe na kilka sposobów. Główne z nich to:



Rys. 9. Wartość efektywności hamowania odzyskowego w funkcji średniej liczby pojazdów znajdujących się na obszarze zasilania podstacji.

Fig. 9. Value of regenerative braking efficiency in average number of vehicles present in supply area of substation.

## 7. MEASURING ENERGY LOSSES IN TROLLEYBUS TRACTION NETWORK

Energy transmission losses  $E_{losses}$  in the power supply system during transmission of energy to traction vehicle occur in feeders and in traction network. Their momentary value can be defined as the difference between the energy absorbed  $E_{Vehicle}$  by the vehicle from traction network, and the energy absorbed  $E_{TSubstation}$  from traction substation:

$$E_{straty} = E_{PT} - E_{poj} \quad (1)$$

Assuming no recovery to traction network, total energy of the vehicle  $E_{vehicle}$  must be delivered to traction substation. This is why the above formula can be presented on the basis of voltage  $U_{vehicle}$  on the vehicle's receivers and the voltage of traction substation  $U_{TSubstation}$ :

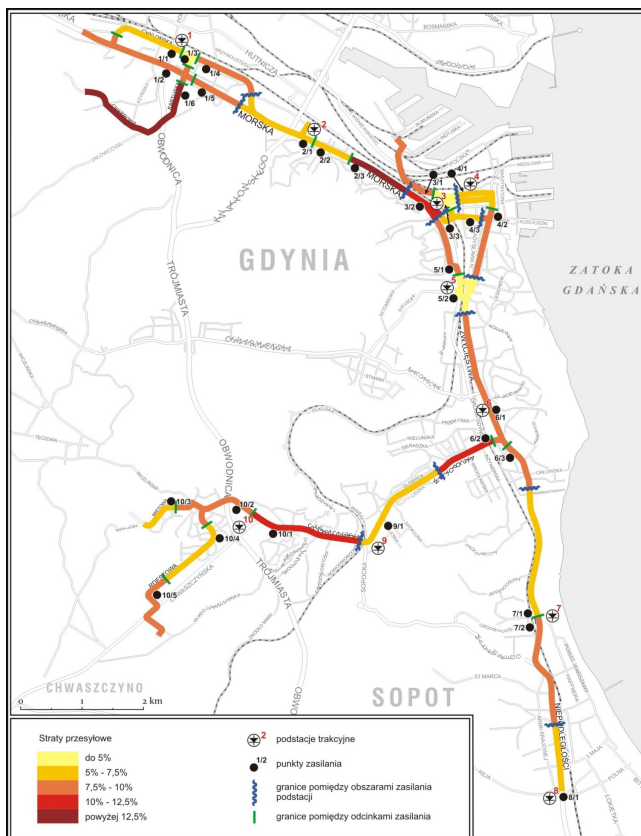
$$E_{straty} = I_{poj} \cdot (U_{PT} - U_{poj}) \quad (2)$$

The corresponding equivalent circuit is presented on fig. 10. The relative  $e$  value of transmission losses can be determined as:

$$e = I_{poj} \cdot \frac{(U_{PT} - U_{poj})}{U_{poj}} \quad (3)$$

By averaging the above values in-time domain, we receive average values of transmission losses in specific parts of power supply system.

In April 2012, measurements in power supply system in Gdynia were carried out. They were carried out on traction substations and in trolleybuses. For the measuring purposes, an on-board measuring system of used energy with GPS was used, which the vehicles operating in Gdynia are equipped with. It allows for precise determination of energy consumption on specific supply sections. As the value of substation voltage  $U_{TSubstation}$  the expected voltage value of busbars at direct voltage



Rys. 11. Mapa strat przesyłowych z podziałem na poszczególne odcinki zasilania.

Fig. 11. Map of transmission losses with division into specific supply sections.

- stacjonarne zasobniki energii;
- taborowe zasobniki energii;
- falowniki podstacyjne;
- zmiana topologii układu zasilania;
- wprowadzenie dwustronnego układu zasilania sieci trakcyjnej.

Przedstawione badania umożliwiają ocenę poszczególnych metod zwiększenia efektywności energetycznej układu zasilania elektrycznej komunikacji miejskiej oraz wskazanie optymalnych warunków pracy dla każdego z tych rozwiązań.

Przeprowadzone pomiary potwierdzają wyniki analizy symulacyjnej przedstawionej w poprzedniej części artykułu. Wskazują na silną zależność pomiędzy warunkami ruchowo – strukturalnymi układu zasilania, a efektywnością wykorzystania hamowania odzyskowego. Kluczowym elementem decydującym o skutecznym wykorzystaniu rekuperacji jest topologia sieci trakcyjnej. W przypadku obszarów zasilania na których występuje znaczna liczba pojazdów, czyli o dużej wielkości bądź wysokiej intensywności ruchu widoczne jest bardzo dobrze wykorzystanie energii hamowania na drodze pojazd – pojazd, które czyni zbędnym stosowanie dodatkowych urządzeń absorbujących energię odzysku jak zasobniki superkondensatorowe lub falowniki podstacyjne. Niewykorzystanie energii rekuperacji występuje natomiast w obszarach o małej intensywności ruchu.

switchboard was taken. Fig. 11 presents a map of transmission losses with division into specific supply sections.

## 9. CONCLUSIONS

There are a few possible ways of increasing the efficiency of using the regenerative braking. The main ones are:

- Stationary energy storage;
- trackside energy storage;
- substation inverter;
- altering the topology of power supply system;
- introducing double-sided power supply system

for traction network.

Presented studies allow for evaluation of each method of increasing the energy efficiency of power supply system for electric public transport, and they point out the best operational conditions for each of the solutions.

The carried out measurements confirm the results of simulation analysis presented in the previous part of the article. They indicate the strong relation between motion-structural conditions of the power supply system, and efficiency of using regenerative braking. The key elements determining the efficiency of using energy recovery is the topology of traction network. In case of supply areas where there is a large number of vehicles, therefore a high intensity of traffic, reusing of the braking energy in the vehicle - vehicle exchange is explicitly observable. This means using additional energy absorption devices, such as super capacitor energy storage or substation inverters, is not necessary. Whereas the energy recovery is not used in areas of small traffic intensity.

It should be noted that braking energy transmission in the vehicle - vehicle exchange is the cheapest and the most efficient way of using energy recovery in vehicles, in fact much cheaper than using energy storage or substation inverters.

Therefore, to increase the degree of the use of energy recovery, first we have to consider the possibility to reconfigure the power supply system which would improve the transmission of braking energy. In numerous instances, very good results can be obtained with minor costs. Small substation supply areas which are galvanically separated from the rest of the network should be avoided. Supply area of such substations should be connected with each other in order to create possibly the largest transmission area of recovered energy. Therefore, it is recommended to introduce a double-sided power supply of the traction network, which allows for increasing the degree of using the recovery energy and minimises the transmission losses. Double-sided power supply can be used both in centralised as well as decentralised power supply sys-

Należy zwrócić uwagę, iż przepływ energii hamowania na drodze pojazd – pojazd jest najtańszym i najbardziej efektywnym sposobem wykorzystania rekuperacji w pojazdach, znacznie tańszym od zastosowania zasobników lub falowników podstacyjnych.

Dlatego chcąc zwiększyć stopień wykorzystania odzysku energii w pierwszej kolejności należy rozważyć możliwość rekonfiguracji układu zasilania, która ułatwi przepływ energii hamowania. W wielu sytuacjach niewielkim nakładem kosztów można osiągnąć bardzo dobre rezultaty. Należy unikać małych obszarów zasilania podstacji, które są odseparowane galwanicznie od pozostałej sieci. Obszary zasilania takich podstacji należy łączyć ze sobą aby stworzyć jak największy obszar przepływu energii rekuperacji. Dlatego zalecane jest wprowadzanie dwustronnego zasilania sieci trakcyjnej, które umożliwia zwiększenie stopnia wykorzystania rekuperacji jak i zmniejszenie strat przesyłu. Dwustronne zasilanie może być zastosowane zarówno w centralnych, jak i zdecentralizowanych układach zasilania. Przykładowe rozwiązania dwustronnego zasilania zaprezentowano w poprzedniej części artykułu. Układ zasilania zaprojektowany z uwzględnieniem przepływu energii rekuperacji jest w stanie przyjąć znaczną większość odzyskiwanej energii. Zastosowanie zasobników jest celowe w obszarach sieci trakcyjnej o specyficznym charakterze; w terenach górskich bądź o nietypowym rozkładzie ruchu.

Straty przesyłowe są uzależnione od intensywności ruchu pojazdów (obciążenie sieci trakcyjnej) oraz rezystancji układu zasilania. O ile intensywność ruchu pojazdów jest uzależniona od czynników zewnętrznych i służby energetyczne mają ograniczony wpływ na nią, to zwiększenie efektywności układu zasilania może być osiągnięte za pomocą zmniejszenia rezystancji sieci trakcyjnej i zasilaczy. Rezystancja ta zależy w znacznym stopniu od struktury przestrzennej układu zasilania, który determinuje schemat zastępczy układu zasilania. Od tego zaś zależy wartość rezystancji całkowitej sieci zasilającej. Najprostszym sposobem zmniejszenia tej rezystancji jest wprowadzenie dwustronnego zasilania pomiędzy sąsiednimi podstacjami bądź w ramach jednej podstacji trakcyjnej. Analiza teoretyczna wpływu zmiany konfiguracji na straty przesyłowe w układzie zasilania została przedstawiona w pierwszej części niniejszego cyklu. Jak wykazano, wprowadzenie dwustronnego zasilania umożliwia zmniejszenie strat przesyłu energii w układzie zasilania o 30% przy minimalnych nakładach finansowych. Ponadto, w znaczny sposób podnosi efektywność wykorzystania rekuperacji energii elektrycznej.

W ciągu ostatnich dwudziestu lat dokonał się znaczny postęp w zakresie konstrukcji pojazdów i sieci trakcyjnej, czego niezaprzeczalnym efektem jest spadek awaryjności. Przykładowo, w gdyńskiej sieci trolejbusowej liczba awarii sieci trakcyjnej spadła ponad dziesięciokrotnie. Nastąpił także rozwój techni-

tems. Example solutions form double-sided power supply was presented in the previous part of the article. A power supply system designed with the consideration of the transmission of recovered energy is able to absorb a significant majority of the recovered energy. Using energy storages is purposeful in areas of traction network with specific characteristics - in hilly locations or in areas with an unusual traffic distribution.

Energy transmission losses depend on the vehicle traffic intensity (overloading of the traction network), and on the resistance of power supply system. Even though the vehicle traffic intensity depends on external factors and energy maintenance services cannot do much about it, increasing the efficiency of power supply system can be achieved by decreasing the resistance of traction network and the feeders. This resistance is highly dependent on spatial structure of the feeder which determines the equivalent circuit of power supply system. Which in turn impact the value of total resistance of power supply system. The easiest way to minimise this resistance is the introduction of double-sided power supply between neighbouring substations or within one traction substations.

Theoretical analysis of the impact of altering configuration on energy transmission losses in the power supply system is presented in the first part of this cycle. As it was pointed out, introducing a double-sided power supply allows for decreasing the transmission losses in power supply by 30% with minimal financial investment. Moreover, it significantly increases the efficiency of electricity recovery.

The last twenty years have seen a significant advancement in terms of construction of vehicles and traction networks, and the decrease in failure rate is an undeniable effect of that. For example, the number traction network failures in Gdynia's trolleybus network is ten times lower. There has also been a development of protective technologies which enable detection of short circuit with a high accuracy. The development of distributed control systems allows for the remote control of disconnectors on the traction network, for example in Gdynia's trolleybus network all network disconnectors are controlled remotely by the power distribution centre in a semiautomatic way. These elements allow for moving away from the traditional method of sectioning network traction into short sections powered with long cables connected to traction substations. A contemporary traction network should be divided into long sections supplied from two or three substations. Modern protective technology enables effective detection of failures in such systems, and the remote controlling of disconnectors allows for sec-

ki zabezpieczeniowej, umożliwiające wykrywanie zwarć z bardzo wysoką precyzją. Rozwój systemów rozproszonego sterowania umożliwia zdalne sterowanie odłącznikami na sieci trakcyjnej, w gdyńskiej sieci trolejbusowej wszystkie odłączniki sieciowe są sterowane zdalnie z centrum dyspozycji mocy w sposób półautomatyczny. Elementy te umożliwiają odejście od klasycznego sposobu sekcjonowania sieci trakcyjnej na krótkie odcinki zasilane za pomocą długich kabli z podstacji trakcyjnych. Współczesna sieć trakcyjna powinna być podzielona na długie sekcje zasilane z dwóch lub trzech podstacji. Współczesna technika zabezpieczeniowa umożliwia skuteczną detekcję uszkodzeń w takich systemach, a zdalnie sterowane odłączniki umożliwiają na rozdzielanie odcinków zasilania na mniejsze części w przypadku awarii. Dzięki takiemu podziałowi sieci spada rezystancja zastępcza układu zasilania widziana z pojazdu, a co za tym idzie, spadają straty przesyłowe (rys. 3). Umożliwia też ona lepszy przepływ energii rekuperacji pomiędzy pojazdami, czego skutkiem jest zwiększenie odzysku energii.

## BIBLIOGRAFIA

## REFERENCES

1. Bartłomiejczyk M., Mirchevski S., *Reducing of energy consumption in public transport – results of experimental exploitation of super capacitor energy bank in Gdynia trolleybus system. PEMC 2014 Conference, Antalya, 22-24.09.2014.*
2. Bartłomiejczyk M., Połom M., Staroński K., *Próba eksploatacja zasobnika superkondensatorowego gdyńskiej sieci trolejbusowej. Technika Transportu Szynowego, 6/2013, s. 40-44.*
3. Połom M., *Projekt rewitalizacji i rozwoju komunikacji trolejbusowej w Gdyni współfinansowany ze środków unijnych. Transport Miejski i Regionalny, nr 6, 2011, s. 23-27.*
4. Połom M., Palmowski T., 2009, *Rozwój i funkcjonowanie komunikacji trolejbusowej w Gdyni. Wydawnictwo Bernardinum, Gdynia-Pelplin, ss. 152.*
5. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Napięcie sieci trakcyjnej jako wyznacznik możliwości zwiększenia odzysku energii. Technika Transportu Szynowego., nr 4, 2013, s.42-46.*
6. Jandura P., *Simulace rekuperace elektrické energie tramvaje pro danou trať. VLIII. Sešit Katedry Elektrotechniky, VŠB Ostrava, Ostrava, 2014.*
7. Kubín J., *Závislost spotřeby tramvajového provozu na vnějších podmínkách. VLIII. Sešit Katedry Elektrotechniky, VŠB Ostrava, Ostrava, 2014.*
8. Figlus T., Wilk A., Gawron A., *Analiza stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego dla obszaru miasta, Logistyka, nr 3, 2014, s. 1698-1706.*
9. Radecki A., Chudzik P., *Algorytm sterowania zasobnikiem superkondensatorowym pojazdu trakcyjnego minimalizujący przesyłowe straty mocy uwzględniający stany pracy sieci trakcyjnej, Przegląd Elektrotechniczny, R. 90, nr 6/2014*
10. Chudzik P., Radecki A., Nowak R., *Wyznaczanie parametrów sieci trakcyjnej niezbędnych do minimalizacji strat przesyłowych w pojeździe z zasobnikiem superkondensatorowym, Biul. Tech. Inf. Oddz. Łódz. Stow. Elektr. Pol. 2014 nr 1 s.5-11*