

# Zagadnienia racjonalizacji zużycia energii elektrycznej w systemie zelektryfikowanego transportu kolejowego

**Wielkość zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym jest funkcją wielu zmiennych i zdeterminowana jest jakością stosowanych rozwiązań technicznych i organizacyjnych, które przekładają się na określone koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Stąd też w obszarze zagadnień związanych z racjonalizacją zużycia energii elektrycznej mieszczą się zarówno analizy techniczne, jak też finansowe i ekonomiczne. Oceny globalne powinny uwzględniać wszystkie wymienione uwarunkowania, ponieważ tylko w takim przypadku będą one kompleksowe i wiarygodne.**

Problem racjonalizacji zużycia energii w zelektryfikowanym transporcie kolejowym ma charakter wielowymiarowy i obejmuje nie tylko czynniki kształtujące poziom zużycia energii na cele trakcyjne, lecz także dobór środków technicznych zapewniających efektywne zasilanie pojazdów z uwzględnieniem uzasadnionych finansowo wielkości nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych układów zasilania zelektryfikowanych linii kolejowych, taboru, organizacji ruchu i przewozów. Racjonalizacja zużycia energii elektrycznej w zelektryfikowanym transporcie kolejowym była tematem projektu badawczego zamawianego przez KBN, realizowanego przez Politechnikę Warszawską, Centrum Naukowo-Badawcze Kolejnictwa oraz Centralne Biuro Projektowo-Badawcze Kolprojekt.

## Opis systemu

Racjonalizacja zużycia energii elektrycznej nie zawsze jest tożsama, choć jest to niejednokrotnie tak pojmowane, z minimalizacją zużycia energii, gdyż istnieje wiele uwarunkowań uzasadnionych ofertą przewozową i *a priori* zakładających wzrost zużycia energii. Dotyczy to szczególnie wzrostu prędkości jazdy i podwyższenia komfortu podróży w kwalifikowanych przewozach pasażerskich, a także zmniejszenia mas i podwyższenia prędkości w wybranych kategoriach przewozów towarowych.

Minimalizacja zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym, traktowana jako niezależne i nadrzędne zadanie optymalizacyjne, prowadzi do konieczności zapewnienia idealnych warunków technicznych, wymagających wykorzystania najnowszej techniki i technologii oraz wysokich nakładów nie uzasadnionych finansowo i ekonomicznie. Poszukiwanie rozwiązania racjonalnego wymaga kompromisu w relacjach wzajemnych między wielkościami zużycia i strat energii (sprawność systemu) oraz mocy, kosztami energii, kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi a wpływami.

Racjonalizacja zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym obejmuje zarówno bezwzględne wskaźniki odnoszące się do energochłonności przewozów, jak i relacje korzyści i kosztów wynikające z realizacji tych przewozów przy określonym poborze energii.

Działania mające na celu racjonalizację zużycia energii w zelektryfikowanym transporcie kolejowym zawierają się w obszarze problemów obejmujących działania doraźne i perspektywiczne natury organizacyjnej, finansowej i technicznej w ramach przedsiębiorstwa PKP, z uwzględnieniem zewnętrznych uwarunkowań ekonomiczno-gospodarczych.

Podstawowymi uwarunkowaniami zewnętrznymi są:

- priorytety polityki transportowej, z uwzględnieniem uzależnień międzynarodowych,
- sytuacja na rynku paliw i energii,
- stan gospodarki,
- preferencje dla przewozów zbiorowych i transportu ekologicznego jakim jest kolej.

Od uwarunkowań tych w dużym stopniu zależy popyt na przewozy kolejowe pasażerskie i towarowe, poziom dotacji na modernizację kolei, a także poziom kosztów własnych kolei.

Do rozwoju każdego sektora działalności transportowej (kolei, transportu drogowego i lotniczego) istotne jest w jakiej części ich koszty własne będą pokryte przez podatnika, a w jakiej przez klienta, a także jak będą się kształtowały ceny paliw i energii elektrycznej.

Uwarunkowania wewnętrzne systemu, mające charakter sprzężeń interakcyjnych, określają wpływ poszczególnych elementów każdego z podsystemów zelektryfikowanej linii kolejowej na wielkość zużycia energii i jej koszt oraz wielkość inwestycji niezbędnych do realizacji przewozów.

Każda z linii kolejowych charakteryzuje się pewną specyfiką określoną przez specjalizację przewozów, poziom rozwoju infrastruktury, intensywność przewozów, przepustowość, charakterystykę drogi kolejowej. Stąd też nie jest możliwa jednoznaczna ocena globalna całej sieci kolejowej w ujęciu innym niż statystyczne. W analizach racjonalizacji zużycia energii elektrycznej, opartych na badaniach wzajemnych interakcji między podsystemami linii kolejowej, zagadnienie to można rozpatrywać globalnie dla określonych linii lub ich części i wybranych zagadnień o charakterze lokalnym. Istotą badań jest określenie wzajemnych zależności między podsystemami dystrybucji (zasilanie elektroenergetyczne) i odbioru energii (trakcja) a podsystemami sterowania, mającymi wpływ na wielkość zużycia energii (organiza-

cja ruchu i przewozów, droga kolejowa, systemy sterowania i sygnalizacji).

Należy wyróżnić następujące obszary struktury linii kolejowej podlegające analizie racjonalizacji zużycia energii:

- analiza eksploatacji linii do celów bieżącej lub doraźnej oceny wskaźników energochłonności,
- analiza przedsięwzięć modernizacyjnych i inwestycyjnych z uwzględnieniem aspektu racjonalizacji zużycia energii.

W ramach umów i programów międzynarodowych, zawartych z Komisją Transportu UE oraz międzynarodowymi organizacjami transportowymi, obejmujących sieć europejskich międzynarodowych linii kolejowych dużej prędkości (AGC), transportu kombinowanego (AGTC) oraz korytarzy kreteńskich, a także konieczności dobudowy linii uzupełniających, program modernizacji obejmuje linie o długości ok. 6000–7000 km w perspektywie do 2015 r. Dla lat po 2015 r. rozważana jest koncepcja budowy nowych linii magistralnych szybkiego ruchu północ-południe i wschód-zachód.

Podstawowym założeniem funkcjonowania przedsiębiorstwa jest obecnie samodzielność finansowa, która wymusi przedsięwzięcia zmierzające do zmniejszenia kosztów własnych i operacyjnych. W budżecie PKP udział kosztów energii elektrycznej wynosi około 5,5% (dane za 1998 r.). Procentowy udział kosztów energii w budżecie kolei ma trend rosnący, który będzie utrzymywany w najbliższych latach w związku z wprowadzeniem wyższych prędkości jazdy oraz urealnieniem cen energii z obecnych około 0,06 USD/kWh do 0,0–0,1 USD/kWh. Stąd też działania zmierzające do racjonalizacji zużycia energii są jak najbardziej uzasadnione w ramach działań zmierzających do minimalizacji kosztów własnych kolei.

Racjonalizacja zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym jest w ujęciu globalnym zagadnieniem długofalowym wymagającym:

- określenia zakresu długotrwałych przedsięwzięć inwestycyjnych w oparciu o prognozy przewozów, prognozy cen energii, kalkulację kosztów własnych,
- operacyjnego sterowania systemem w realnych warunkach ruchowych (bieżące krótkoterminowe prognozy zapotrzebowania na energię z realizacją na bieżąco zakupu energii, sterowanie ruchem, programami optymalnego rozprzyszczenia energii w sieci, bieżącą korektą rozkładów jazdy pociągów niemarszrutowych, koordynacją dyspozycji ruchowej i energetycznej).

Zużycie energii elektrycznej w transporcie kolejowym jest uzależnione od wielu czynników (zmiennych, atrybutów), obejmujących: charakterystyki, parametry i właściwości, a definiowanych w postaci zbiorów wartości, grafów, zależności lub wyrażeń analitycznych.

Analiza zagadnień związanych z racjonalizacją zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym jest możliwa przy zastosowaniu metod badawczych z dziedziny analizy systemowej, pozwalających na określenie wpływu poszczególnych podsystemów i ich elementów na wielkość zużycia energii z uwzględnieniem ograniczeń zewnętrznych [3, 4, 5, 6, 9, 11]. W projekcie badawczym [9] szczególnie dużo uwagi poświęcono zagadnieniom sprzężeń interakcyjnych

między poszczególnymi podsystemami, zasadom dekompozycji systemu i jego strukturze hierarchicznej.

Wewnętrzne sprzężenia interakcyjne określają nie tylko oddziaływanie poszczególnych podsystemów lub ich elementów na wielkość zużycia i koszt energii, lecz także oddziaływanie przedsięwzięć związanych z racjonalizacją zużycia energii na pracę i parametry tych podsystemów.

Wielkość zużycia energii zależy od parametrów funkcjonalnych większości podsystemów linii, zwłaszcza od:

- organizacji przewozów i sterowania ruchem,
- drogi kolejowej,
- taboru trakcyjnego i wagonów,
- elektroenergetyki kolejowej,
- eksploatacji.

System zelektryfikowanej linii kolejowej przedstawiono w formie schematu strukturalnego na rysunku 1, na którym wyróżniono do celów zagadnień racjonalizacji zużycia energii podsystemy istotne pod względem oceny energochłonności przewozów.

### Kryteria oceny i metodologia badań

Zagadnienie racjonalizacji zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym można sprowadzić do analizy systemu w oparciu o wielkości kryterialne obejmujące ocenę energochłonności przewozów oraz efektywność ponoszonych kosztów operacyjnych, eksploatacyjnych i inwestycyjnych, z uwzględnieniem udziału tych kosztów w ogólnych wskaźnikach finansowych linii oraz w ich relacji do wpływów z przewozy.

Wielkościami kryterialnymi są:

- koszt energii  $A_{TR}$  na cele trakcyjne (łącznie z kosztami pochodnymi: koszt dostawy i przesyłu, opłaty za moc i za oddziaływanie zakłócające),
- koszt strat energii  $\Delta A$ ,
- nakłady  $N$  na infrastrukturę energetyczną,
- koszty eksploatacyjne  $KE$  w sektorze energetyki kolejowej,
- stosunek sumy kosztów  $C$  energii, strat energii, kosztów eksploatacyjnych do sumy wpływów  $B$  z przewozów na linii,
- wskaźniki finansowe ( $IRR$ ),

Kryteria można przedstawić w postaci globalnej funkcji celu:

$$\min \{A_{TR}, \Delta A, N, KE\} \quad (1)$$

z ograniczeniem nierównościowym nakładanym obligatoryjnie:

$$\frac{C}{B} \geq a \quad (2)$$

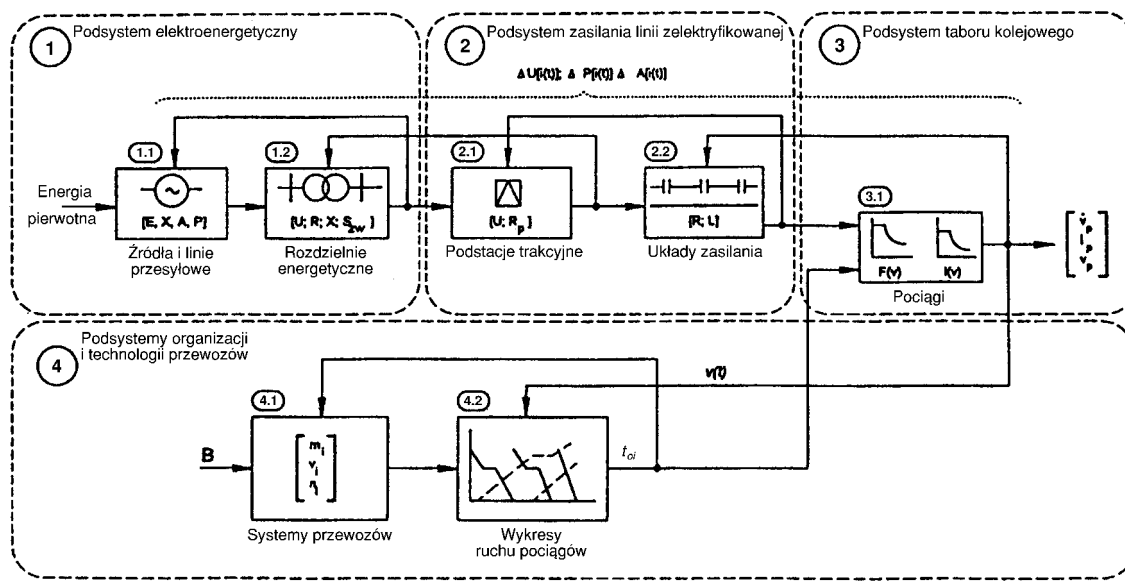
$$IRR \geq i$$

gdzie:  $a$  – współczynnik rentowności.

Analizy stosowanych rozwiązań strukturalnych, technicznych, organizacyjnych, inwestycyjnych i modernizacyjnych, zmierzających do racjonalnego zużycia energii, prowadzone są wielowariantowo, a wybór rozwiązania najlepszego spośród wariantów dopuszczalnych dokonywany jest w oparciu o kryteria finansowe z uwzględnieniem czynnika czasu.

Globalne kryterium finansowe oceny ma postać:

$$\min \{KA, K\Delta A, N, KE\} \quad (3)$$



Rys. 1. Schemat systemu zelektryfikowanej linii kolejowej z wydzielonymi podsystemami

W odniesieniu do energetyki kolejowej, z zależności (3) należy pominąć koszt energii  $KA$ , ponieważ koszt ten jest kosztem operacyjnym dla przewoźnika (operatora). Zależność (3) przyjmuje postać (4):

$$\min \{K\Delta A, N, KE\} \quad (4)$$

Na rysunku 2 zamieszczono schemat procesu analizy z wykorzystaniem modeli symulacyjnych systemu i podsystemów zelektryfikowanej linii kolejowej oraz procesów podejmowania decyzji w odniesieniu do omawianego problemu.

Przedsięwzięcia zmierzające do racjonalizacji zużycia energii elektrycznej zawierają się zasadniczo w obszarach działań:

□ długookresowych, takich jak:

- unowocześnienia infrastruktury energetycznej,
- wprowadzenia do eksploatacji nowych typów taboru trakcyjnego i wagonów,
- poprawy parametrów drogi kolejowej (likwidacja ograniczeń prędkości, zwiększanie prędkości z uwzględnieniem dynamiki jazdy dostosowanej do długości odcinków, prawidłowe profilowanie trasy).

Wdrożenie ich oraz zakres realizacji wynikają głównie z dotychczasowych zaniedbań i stosowania nieefektywnych rozwiązań technicznych.

□ Krótkookresowych (doraźnych) (możliwych do wprowadzenia przy niewielkich nakładach), zawierają się one w obszarze przedsięwzięć organizacyjnych, takich jak:

- organizacja ruchu i przewozów,
- wykorzystanie możliwości zakupu energii po cenach minimalnych (strefowych i hurtowych).

Na załączonych wykresach i w tablicach zamieszczono przykładowe zestawienie wielkości danych i wyników wykorzystywanych i uzyskanych z analiz zamieszczonych w projekcie badawczym [9].

Na rysunku 3a i b zamieszczono przykładowe zależności wielkości prądów podstacji  $I_{pt}$  dla różnych mocy pobie-

ranych na cele trakcyjne ( $F \cdot V = 4 \div 10$  MW) od rezystancji zastępczej układu zasilania  $R_z$ , z uwzględnieniem ograniczeń wielkości napięć na pantografie w przedziale 1,8–3,0 kV ( $U_{pgr} - U_{pn}$ ), przy ograniczeniu pobieranych prądów od wartości  $I_{mx}$  odpowiadającej napięciu  $U_{pn}$  do  $I_{gr}$  odpowiadającego napięciu  $U_{pgr}$ .

Straty mocy  $\Delta P$  w systemie są różnicą między mocą pobieraną ( $U_{d0} \cdot I_{pt}$ ) a mocą mechaniczną ( $F \cdot V$ ):

$$\Delta P = U_{d0} \cdot I_{pt} - F \cdot V \quad (5)$$

Straty mocy są sumą strat w systemie prądu przemiennego, podstacji, sieci trakcyjnej i w napędzie lokomotyw. Rezystancja  $R_z$  jest wielkością zależną od parametrów układu zasilania prądu stałego i przemiennego.

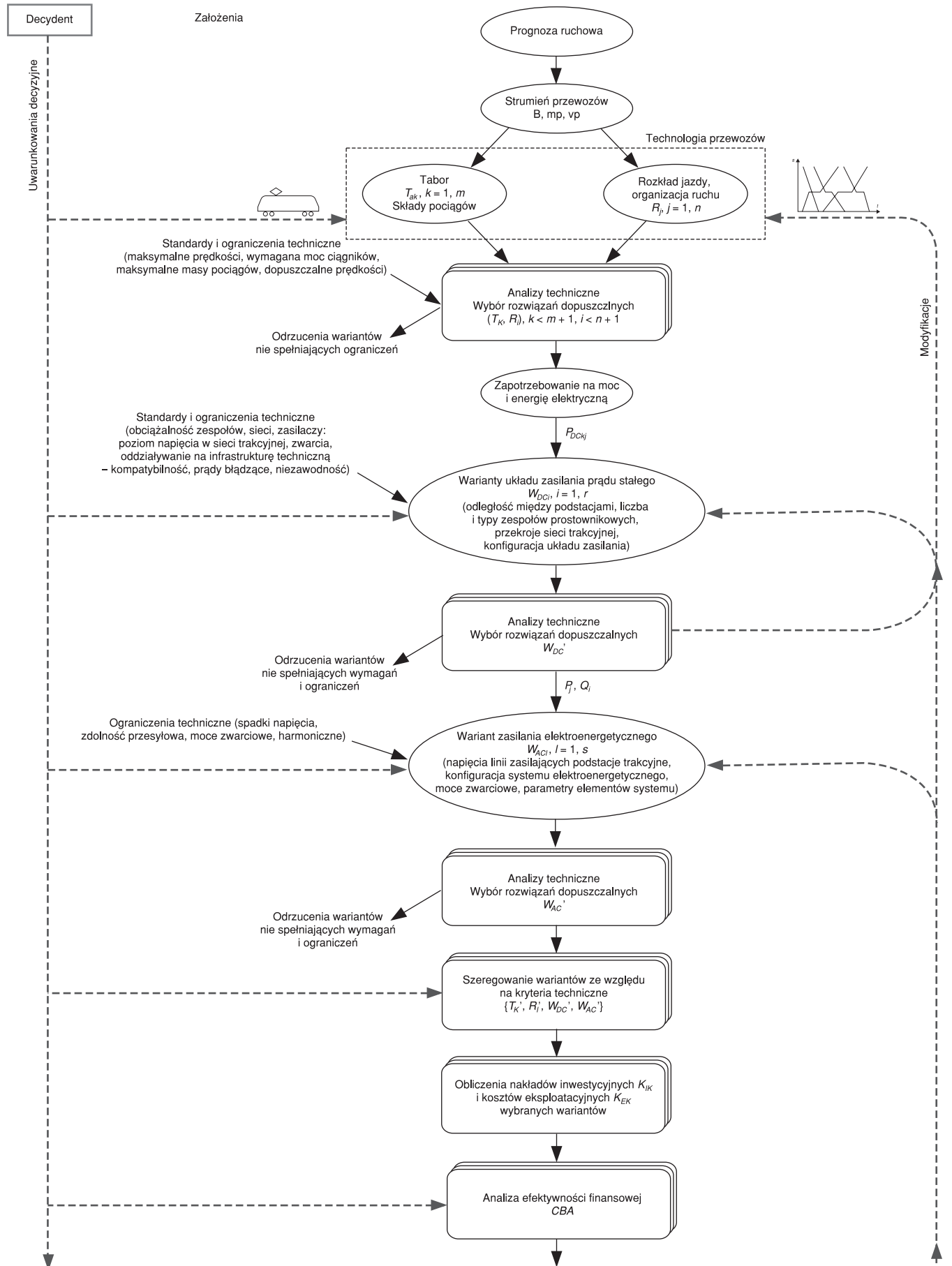
W tablicy 1 zestawiono zalecane kryteria techniczne wymiarowania układów zasilania określające racjonalny zakres wartości czasów oraz stopni wykorzystania mocy zainstalowanych i szczytowych.

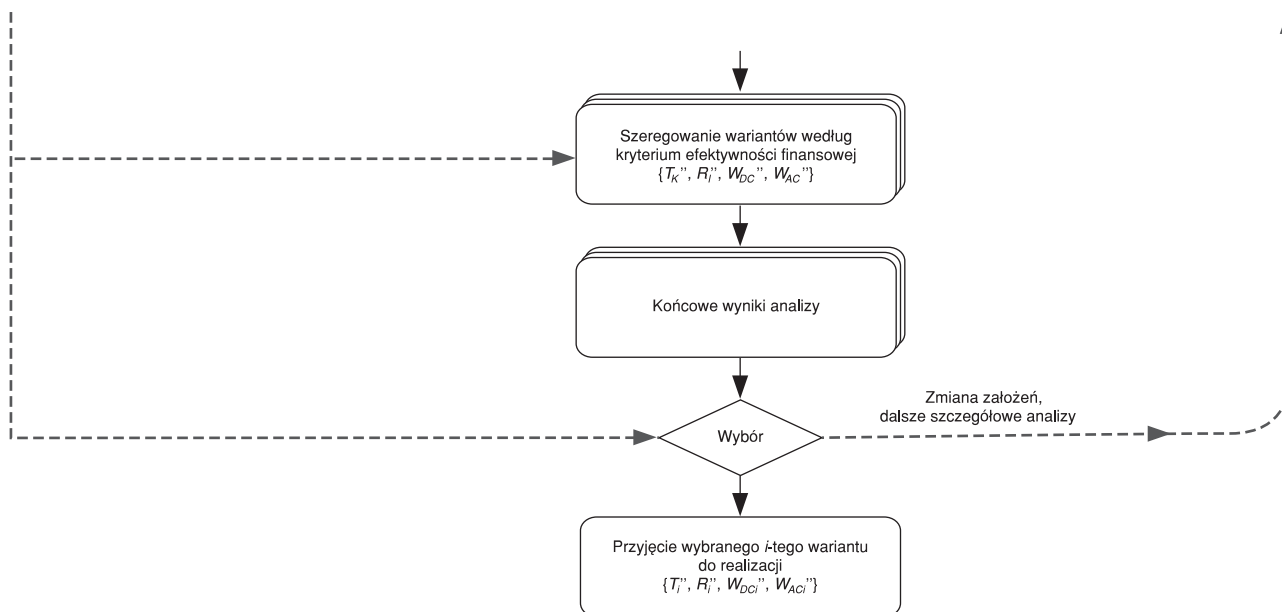
W tablicy 2 zamieszczono przykład wpływu zakłóceń ruchowych na moc średnią i pobór energii. Na rysunku 4 pokazany jest rozkład mocy szczytowych dla różnych wariantów organizacji ruchu. Na rysunkach 5 i 6 pokazano zestawienie zależności mocy średnich i zużycia energii dla przejazdu określonego odcinka przez pociągi różnych kategorii oraz wielkość zużycia energii (okład) w zależności od masy i prędkości jazdy pociągów pasażerskich.

Na rysunku 7 zamieszczono w formie wykresów przykładowe koszty wyposażenia układu zasilania w zależności od rezystancji zastępczej wpływającej na wielkości spadków napięć i strat energii.

Poziom zużycia energii w przewozach kolejowych można kształtować przez właściwą kategoryzację przewozów, a głównymi czynnikami określającymi energochłonność są prędkość i masa brutto pociągu.

Wobec istotnych ograniczeń i uwarunkowań, racjonalizację zużycia energii elektrycznej można określić jako: – dążenie do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej,





Rys. 2. Schemat

Tablica 1

## Zalecane kryteria techniczne wykorzystania mocy zainstalowanych

Kryterium	Wskaźnik
Wykrywalność prądów zwarcia	$I_{zwm} > I_{obcmax} (P_{pmax}); P_{sr} \rightarrow P_{sz}$
Stożek wykorzystania mocy szczytowej: $m_{sz} = P_{sr}/P_{sz} = A/(T P_{sz})$	$P_{sr} \rightarrow P_{sz}$ gdzie: $m_{sz}$ – powinno zawierać się w przedziale: (0,4 ÷ 0,5) 0,4 – dla linii o niskiej intensywności ruchu, 0,5 – linie o gęstym ruchu
Stożek wykorzystania mocy zainstalowanej	$n_i = P_{sr}/P_i = A/(T P_i)$ $n_i \rightarrow kr\ msz$ $k_r = P_{sz}/P_{sr}$ $k_r$ – stopień rezerwowania (0,66 ÷ 0,85) $n_i \in (0,264 \div 0,425)$
Czas wykorzystania mocy szczytowej:	$T_{sz} = A/P_{sz} = mT$ (2800 ÷ 3500 h)
Czas wykorzystania mocy zainstalowanej:	$T_i = A/P_i = nT$ (1850 ÷ 2950 h)

gdzie:  $P_{sr}$  – moc średnia,  
 $A$  – zużycie energii,  
 $P_{sz}$  – moc szczytowa podstacji,  
 $P_i$  – moc zainstalowana podstacji.

Tablica 2

## Wpływ zakłóceń ruchu na zwiększony pobór energii i wielkość strat – przykład dla linii magistralnej z ograniczeniem prędkości

	$\Delta_L = 0,86; \Delta_S = 0,93$ Jazda bez zakłóceń			$\Delta_L = 0,86; \Delta_S = 0,92$ Jazda z zakłóceniami			Przyrost zużycia mocy [kW]	Wielkość względem 2200 kW
	$P_{sr}$ [kW]	Wielkość mocy względem 2000 kW	2500 kW	$P + \Delta P$ [kW]	Wielkość mocy względem 2000 kW	2500 kW		
W podstacji trakcyjnej	2500	125%	100%	2760	138,0%	110%	260	125%
Na pantografie	2350	116%	93%	2550	127,5%	102%	225	116%
Na haku	2000	100%	80%	2200	110,0%	88%	200	100%

- ukierunkowania na zmniejszenie kosztów ponoszonych za pobieraną energię,
- określenie racjonalnego poziomu inwestycji energetycznych.

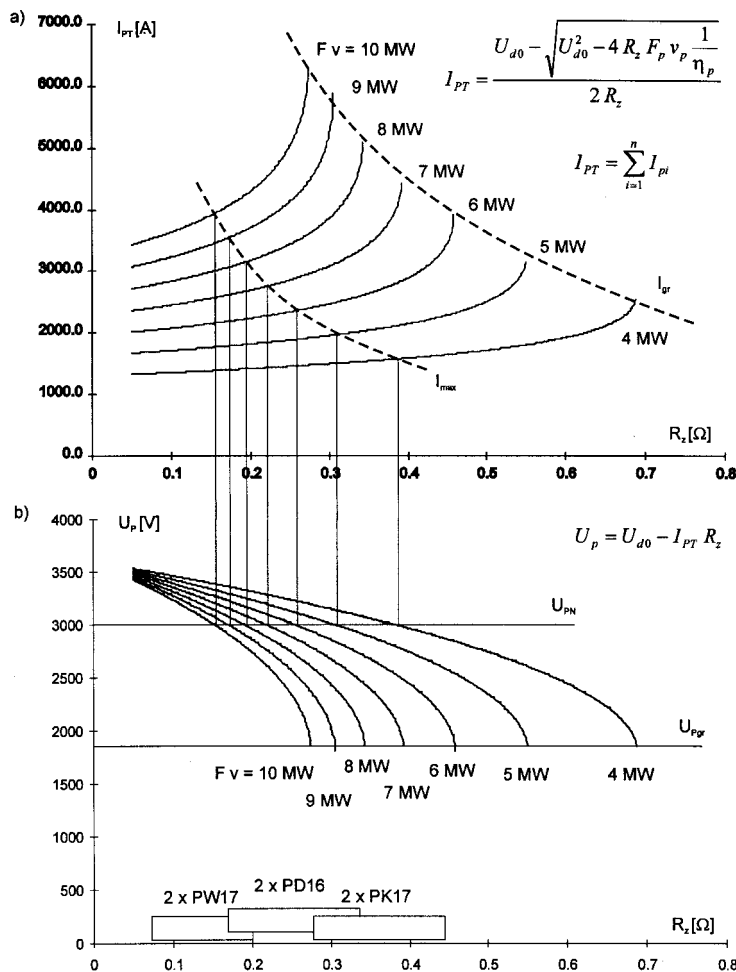
W przypadku negatywnej oceny efektywności zasilania elektroenergetycznego analiza racjonalizacji zużycia energii powinna pozwolić decydentowi na podjęcie decyzji:

- czy realizować projekt?,
- a jeśli tak to jaki?
- jakie są możliwe do uzyskania efekty: krótko- i długoterminowe, efekty techniczne (poprawa niezawodności, standardów technicznych, przepustowości linii), finansowe (ekonomiczne) w porównaniu do opcji „bez projektu”, która stanowi zwykle punkt odniesienia.

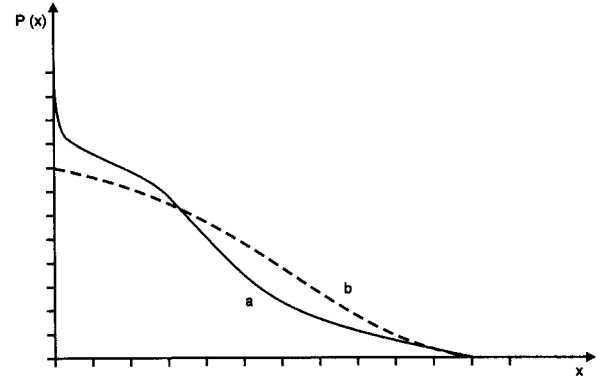
Pod względem struktury metodologia badań jest wielo- i wielowymiarowa.

Początek (założenia wyjściowe) stanowi zdefiniowanie zapotrzebowania na usługi transportowe – prognoza przewozowa:

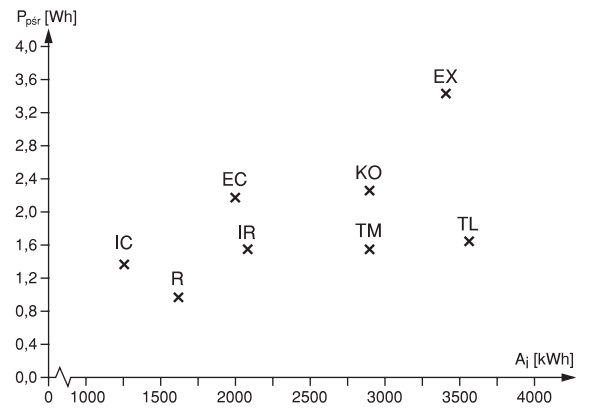
- całkowity strumień przewozów  $B$ , który przekłada się na masy  $m_p$  i prędkości  $v_p$  poszczególnych kategorii pociągów.
- Do realizacji usług transportowych tworzy się możliwe do realizacji zbiory wariantów:



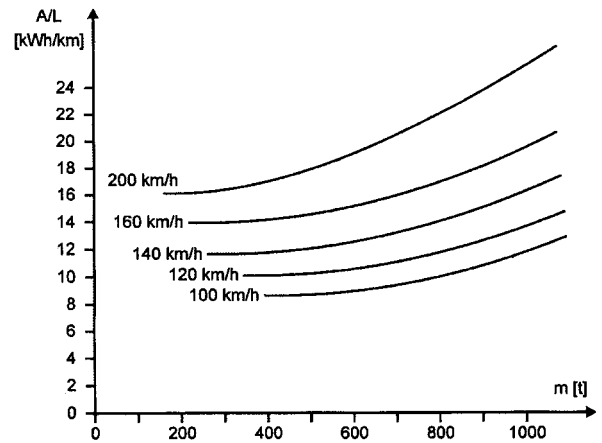
Rys. 3. Graniczne zdolności obciążeniowe  
a - prądy podstacji, b - napięcia na pantografie



Rys. 4. Uporządkowany rzeczywisty rozkład mocy 15-minutowych podstacji  
a - małe wykorzystanie mocy szczytowej, b - znacznie większe wykorzystanie mocy szczytowej (rozkład zalecany)



Rys. 5. Średnie moce i średnie zużycie energii poszczególnych kategorii pociągów  
EX - 200 km/h, 600 t, lokomotywowo; EC - 200 km/h, 320 t, zespolony; IC - 160 km/h, 360 t, lokomotywowo; IR - 120 km/h, 360 t, lokomotywowo; R - 100 km/h, 250 t, 2 x ez; KO - 120 km/h, 800 t, lokomotywowo; TM - 80 km/h, 1800 t, lokomotywowo; TL - 60 km/h, 2800 t, lokomotywowo



Rys. 6. Zużycie energii (okład) w funkcji masy i prędkości jazdy



- taboru (typy lokomotyw  $T_k$  o określonych charakterystykach, składy pociągów),
- organizacji ruchu i rozkładów jazdy  $R$ , (prędkości w funkcji drogi – czasu, ograniczenia prędkości itp.).

Energia i moc, wynikająca z zapotrzebowania do prowadzenia ruchu i na potrzeby nietrakcyjne, dostarczana jest przez wariantowo rozpatrywane:

- układ zasilania prądu stałego charakteryzowany przez parametry: rezystancja podstacji i sieci trakcyjnej oraz napięcie źródłowe – podstacji ( $l$ -wariantów),
- układ zasilania prądu przemiennego, charakteryzowany przez moc zwarciovą, poziom napięcia zasilania i impedancje sieci ( $n$ -wariantów).

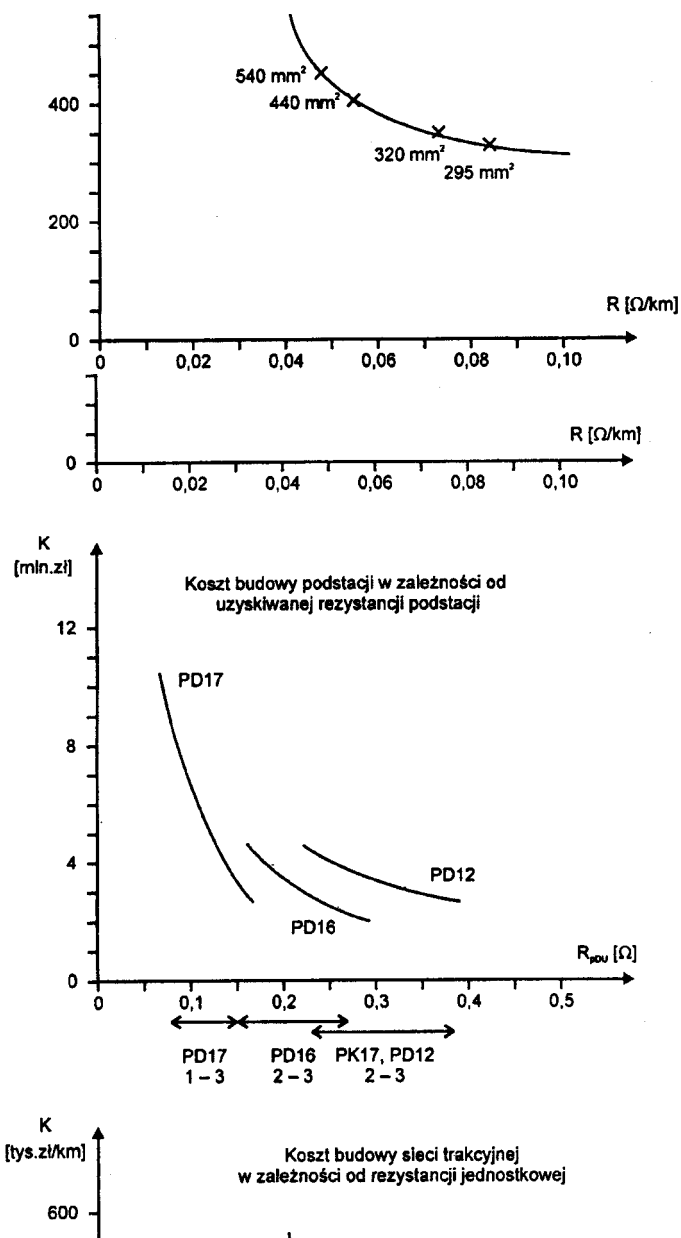
Po przygotowaniu wstępnie opracowanych wariantów do analiz technicznych przyjmuje się tylko wyselekcjonowane warianty dopuszczalne, dla których przeprowadzane są badania symulacyjne warunków funkcjonowania systemu zelektryfikowanej linii kolejowej przy założonych parametrach poszczególnych podsystemów (rys. 2). Na bieżąco dokonuje się sprawdzenia wymaganych standardów technicznych i ograniczeń, eliminując te warianty, które nie spełniają założeń co do zdolności przewozowej zgodnie z prognozą lub te, dla których nie są dotrzymane wymagane kryteria techniczne efektywnego zasilania. W wyniku badań otrzymuje się zbiory wyników, pozwalających uzyskać informacje lub sugestie odnoszące się do przyjętych założeń (np. wymagań co do zdolności przesyłowej mocy przez układ zasilania) dla przejazdu pociągów o największym poborze mocy są spełnione. Wyniki te posłużyć mogą jako dane w pętli sprzężenia zwrotnego oraz jako sugestie do podjęcia decyzji (korekt) do założeń ruchowych, czy preferowanych przez decydenta rozwiązań technicznych, które mają inne uzasadnienie niż rozpatrywane w analizach technicznych (np. zgodność z dotychczas stosowanymi rozwiązaniami, typ rozwiązań technologicznych, wykorzystanie rozwiązań i dostawców krajowych itp., spełnienie wymagań umów międzynarodowych).

Dla grupy pozytywnie ocenionych (z punktu widzenia technicznego) wariantów przeprowadza się obliczenia i analizy kosztów realizacji (inwestycji), z uwzględnieniem rozłożenia wymaganych nakładów w czasie. Następnie przeprowadza się analizę efektywności finansowej poszczególnych wariantów technicznych (Cost Benefit Analysis – CBA) i szereguje je. Efektywność finansowa inwestycji elektroenergetycznych, a także globalna efektywność przedsięwzięć modernizacyjnych zależą od:

- stanu infrastruktury technicznej kolei, organizacji przewozów, systemu rozliczeń finansowych między pionami i sektorami PKP,
- rynku przewozów, polityki transportowej i polityki energetycznej państwa.

Wielkości zużycia energii i strat energii uzyskane w wariantach idealnym pozwalają na określenie przyrostów zużycia i strat energii w warunkach realnych dla różnych rozwiązań wariantowych. Pozwala to na uszeregowanie wariantów względem rozwiązania idealnego, a ponadto na dokonanie oceny wpływu lokalnych rozwiązań optymalnych na optimum globalne dla każdego z przyjętych do analizy roz-

wiązań wariantowych, a także na określenie efektywności tych rozwiązań w relacji korzyści – nakłady i koszty. Ponadto metodologia taka pozwala na weryfikację przyjętych wstępnie założeń dotyczących wariantów realnych w zakresie wyposażenia układu zasilania, wymagań dotyczących



Rys. 7. Przykładowe koszty inwestycyjne elementów układu zasilania linii kolejowej

konstruowania rozkładów jazdy, czy założonej organizacji przewozów i doboru lokomotyw do kategorii pociągów.

Problem racjonalizacji zużycia energii przy projektowaniu nowych linii, jak i modernizowaniu istniejących należy uwzględnić już na etapie prognozowania przewozów i organizacji ruchu. Niedoinwestowanie układu zasilania może powodować ograniczenia w możliwości prowadzenia założonego ruchu, a w najlepszym przypadku tylko nieefektywne gospodarowanie energią (straty, nierównomierność obciążeń podstacji, wyższe moce zamawiane i koszty, niższą niezawodność zasilania).

Możliwe strategie w odniesieniu do projektów w zakresie zelektryfikowanych linii kolejowych, w tym projektów uwzględniających racjonalną gospodarkę energią elektryczną, zestawiono poniżej:

- wszystkie projekty, które są w stanie „obronić się” ze względu na rygorystyczne wskaźniki analizy CBA włączane są do kategorii finansowanych ze źródeł kredytowych (linie o dużym ruchu i wpływach, linie towarowe),
- mniej efektywne wskaźnikowo projekty, jeśli mają uzasadnienie społeczne (mają charakter prestiżowy), włączane są do finansowania, choćby w części z budżetu,
- małe projekty, traktowane jako niewielkie modernizacje lub „rehabilitacje” podłączane są do „wydatków bieżących”, co powoduje, że nie wymaga się wobec nich analiz efektywności,
- projekty, których korzyści są rozłożone w czasie i nie mają one innych uzasadnień wspierających ich wybór, mają małe szanse na realizację.

Zasadniczo wyniki przeprowadzonych badań i analiz [9] pozwalają na stwierdzenie, iż przyjęcie za nadrzędne kryterium oszczędności energii spowoduje, że większość projektów znajdzie się właśnie w tej ostatniej kategorii. Dlatego należy dążyć do wygenerowania rozwiązań kompromisowych, w których kryterium racjonalności zużycia energii, jako pojęcie bardzo szerokie, obejmujące tak dążenie do minimalizacji zużycia energii, jak i ponoszonych kosztów, stanowi jedno z kryteriów, ale nie jedyne uzasadnienie wyboru wariantu (opcji) projektu. Uwzględniać bowiem powinno się także uwarunkowania lokalne, terenowe, aktualne możliwości finansowania inwestycji oraz nadrzędne cele stawiane inwestorowi przez czynniki zewnętrzne (polityka państwa wobec zadań transportu kolejowego), jak i finanse przedsiębiorstwa oraz uwarunkowania innych sektorów kolei i wymagania techniczne.

Należy także poszukiwać możliwości zwiększenia wpływów, np. poprzez włączenie się PKP do obrotu energią czy udostępniania sieci (w tym sieci światłowodowych), czy budowanych do celów zasilania elektroenergetycznego linii wysokich napięć dla innych użytkowników, aby wykorzystać powstałą w wyniku infrastrukturę, co może w istotny sposób poprawić efektywność wariantu najlepszego ze względu na kryterium racjonalności zużycia energii.

Warto podkreślić, że przy ocenie kosztów należy poddać je wnikliwej analizie tak, aby nie tylko podać ich wartość, ale również wyjaśnić cel i podstawę, na jakich je wyznaczono. Odnośnie szacowania czasu „życia projektu” też ist-

nieją rozbieżności, podobnie z alokacją kosztów, wymaganych do realizacji „oszczędnych energetycznie” projektów. Czy inwestycja w racjonalne systemy trakcji elektrycznej jest inwestycją w działalność, która ma przynieść zysk (*profitable*) czy jest to usługa społeczna i jako taka powinna być traktowana jak działalność (*non-profit*)? W związku z tym czy typowe wskaźniki analizy CBA powinny stanowić definitywną podstawę przy ocenie tego typu działań? W raportach niektórych zarządów kolejowych jako uzasadnienie do podjęcia projektu podaje się tylko nadwyżkę NPV opcji „z projektem” w stosunku do NPV w opcji „nic nie robić”. Podejście takie wydaje się racjonalne dla inwestycji modernizacyjnych i powinno się je zalecić do stosowania w warunkach oceny projektów modernizacyjnych PKP. Są pewne aspekty i czynniki zewnętrzne, takie jak: zatłoczenie dróg, ograniczenia lokalizacyjne (teren), polityka socjoekonomiczna, ekologia, które wymuszają podjęcie działań racjonalnych pozwalających na bardziej intensywne wykorzystanie linii kolejowych i zmniejszenie zużycia energii niezależnie od tego, kto za to zapłaci i czy poniesione nakłady zwrócą się w postaci wystarczająco zwiększonych wpływów przedsiębiorstwa kolejowego. Przy czym bezpośrednim źródłem wpływów jest klient, pośrednio zaś podatnik.

#### **Działania na rzecz racjonalizacji zużycia energii w zakresie elektroenergetyki**

Efektywność przedsięwzięć organizacyjnych i modernizacyjnych w odniesieniu do racjonalizacji zużycia energii obejmująca działania w obszarze elektroenergetyki kolejowej oraz formułowaniu założeń do analiz technicznych i finansowych powinna być prowadzona z uwzględnieniem następujących uwarunkowań:

- organizacyjno-czasowych:
  - przy ograniczonych środkach prowadzenie dużej liczby równoległych inwestycji modernizacyjnych powoduje rozciągnięcie ich realizacji w czasie, co praktycznie daje realizację częściową, pozostawienie wąskich gardel i rozmycie zakładanych efektów;
  - w opracowaniach studialnych, koncepcyjnych i analizach wykonalności aspekt terminowości realizacji powinien być traktowany jako kryterium nadrzędne;
  - etapowanie przedsięwzięć modernizacyjnych pozwala na uzyskanie znacznie lepszych wskaźników efektywności finansowej w stosunku do realizacji w szybszym niż jest uwarunkowane wymaganiami oferty przewozowej czasie,
- dopasowanie do aktualnych i prognozowanych przewozów:
  - w ocenie wariantów przedsięwzięć modernizacyjnych należy preferować otwartość systemu na dalszą rozbudowę bez ponoszenia znacznych nakładów na danym etapie realizacji umożliwiającą rozwój systemu w sytuacji zmieniających uwarunkowań na rynku przewozów;
  - podwyższenie jakości oferty przewozowej wiąże się z relatywnym wzrostem zużycia energii uzasadnionym głównie skróceniem czasów przejazdu i wyższym komfortem podróży (przewozy pasażerskie); wzrost zużycia energii powinien mieć racjonalne uzasadnienie przy założeniu elimi-



Tablica 3

## Układy zasilania linii magistralnych – parametry ogólne

$v_{max}$	[km/h]	120	160	200	250		
Sieć trakcyjna	[mm <sup>2</sup> Cu]	320	320	440	440	440	540
Podstacje trakcyjne		2×PD16	2×PD17	2×PD16	2×PD16	2×PD17	2×PD17
Kabiny sekcyjne		+	–	–	±	±	–
Odległości między podstacjami	[km]	25	15	15	12–15	12–15	12
Okład mocy zainstalowanej	[kW/km]	425	748	704	880	935	935

Tablica 4

## Sieci trakcyjne dla linii magistralnych – średnie sprawności przesyłu energii

Sieć [mm <sup>2</sup> Cu]	$v$ [km/h]			
	120	160	200	250
320	0,94–0,95	0,90–0,92	–	–
440	0,95–0,96	0,94–0,95	0,90–0,92	0,88–0,90
540	–	0,96	0,94	0,92

nacji czynników powodujących nadmierne zużycie i straty energii przy bardzo wysokich kosztach;

- w programach przewozów istotne jest uwzględnianie stosunku netto/brutto oraz przebiegów próżnych towarowych, ponieważ są to wskaźniki wpływające znacząco na efektywność finansową i rentowność;
- wzrost kosztów energii wynikający z oferty przewozowej powinien być skorelowany z wielkością wpływów.

Reguły funkcjonowania rynku energii elektrycznej w Polsce:

- w racjonalnym gospodarowaniu energią elektryczną niezbędne są stabilne zasady sprzedaży energii dla PKP;
- w warunkach demonopolizacji rynku energii elektrycznej zasadne jest tworzenie przez kolej własnych sieci elektroenergetycznych wysokich napięć, głównie w obszarze zasilania kolejowych linii magistralnych i linii najbardziej obciążonych z jednoczesnym ich wykorzystaniem do obrotu energią przez PKP (rozwiązanie takie jest od wielu lat wykorzystywane przez koleje włoskie, francuskie, niemieckie, brytyjskie);
- efekty inwestycji elektroenergetycznych w obszarze sieci rozdzielczych powinny być własnością PKP;
- w opracowaniach studialnych i marketingowych należy uwzględniać wzrost kosztów energii, ponieważ dynamika ich wzrostu będzie w najbliższych latach dużo wyższa niż dla pozostałych kosztów, a okresy opracowywania projektów i dokumentacji wynoszą do dwóch lat i po tym okresie wszelkie analizy efektywności finansowej tracą aktualność.

Przykładowe zestawienie typowego wyposażenia układu zasilania linii magistralnej zamieszczono w tablicy 3, natomiast w tablicy 4 podano przeciętne wartości sprawności sieci trakcyjnej.

## Podsumowanie

**1.** Układ zasilania każdej z eksploatowanych linii charakteryzuje się graniczną zdolnością efektywnego zasilania. Ocena zdolności układu zasilania oparta jest na analizie następujących wielkości, parametrów i wymagań [10]:

- zapewnienie wymaganego poziomu napięcia w sieci trakcyjnej,
- akceptowalny poziom strat przesyłowych energii,
- dopuszczalny poziom wykorzystania parametrów obciążeniowych (znamionowych mocy i prądów) zainstalowanych urządzeń i torów prądowych,
- spełnienie warunku wyłączalności zwarć,

- spełnienie wymagań dotyczących zakłóceń (przebiecia i odkształceń (wyższe harmoniczne prądów i napięć).

Układy zasilania zelektryfikowanych linii kolejowych są obwodami pasywnymi, dla których ustalone na etapie projektowania parametry są praktycznie w czasie eksploatacji niezmiennalne, a możliwości sterowania napięciem czy rozdziałem obciążeń między podstacjami bardzo ograniczone i sprowadzają się do:

- doboru liczby czynnych zespołów prostownikowych w podstacji,
- doboru przekładni transformatorów prostownikowych przy pomocy ręcznie przełączanych (w stanie bez obciążenia) odczepów,
- stosowanie urządzeń nadzorujących pobór mocy szczytowych pracujących w trybie czasowego wyłączenia podstacji po przekroczeniu zadanej wartości mocy szczytowej.

Wielkości strat energii i mocy, mocy szczytowych, poboru energii zależą od praktycznie stałych parametrów układu oraz od zmieniających się obciążeń kształtowanych przez sytuację ruchową na linii.

Ze względu na wykorzystanie mocy szczytowych zamawianych, a także wielkości strat energii, liczba pociągów o najwyższych mocach nie powinna stanowić mało znaczącego udziału w ogólnej liczbie pociągów na danej linii (np. kilka procent przy jednoczesnym determinowaniu mocy szczytowej). Opłaty za moc stanowią 20÷40% wartości opłat za energię. Wielkość obciążeń maksymalnych i czasy następstw pociągów w rozkładzie jazdy powinny być skoordynowane z graniczną zdolnością efektywnego zasilania podstacji trakcyjnych i sieci jezdnej danej linii.

**2.** W wyniku przeprowadzonych analiz i badań symulacyjnych można stwierdzić, że zmniejszenie strat energii i kosztów energii w ograniczonym zakresie zapewnia spełnienie następujących zaleceń:

- niezawodność i ciągłość zasilania,

- kształtowanie obciążeń podstacji pod kątem minimalizacji strat energii i kosztów zakupu energii przez dobór przekładni transformatorów prostownikowych,
- minimalizacja jałowych strat energii uwarunkowana utrzymaniem pod napięciem minimalnej liczby czynnych zespołów zapewniających pokrycie aktualnego zapotrzebowania na moc i energię,
- utrzymywanie w sieci trakcyjnej możliwie wysokich poziomów napięć,
- hurtowy zakup energii elektrycznej,
- wykorzystanie w uzasadnionych przypadkach taryf strefowych zakupu energii,
- transmisja energii powinna się odbywać przy możliwie wysokim uzasadnionym dla przesyłanej mocy napięciu przesyłowym (niekorzystne jest np. instalowanie prostowników dodawczych w magistralnych podstacjach trakcyjnych i przesył energii do kabin sekcyjnych linią 3 kV - daje to w efekcie rozwiązanie kosztowne o dużych stratach przesyłowych – ponad 30%),
- należy przyjąć jako zasadę zasilanie przez sieć trakcyjną tylko pojazdów trakcyjnych, sieć ta nie powinna stanowić linii, wykorzystującej do transferu energii,
- należy dążyć do uzyskiwania możliwie małych pochyłeń charakterystyk zewnętrznych zespołów prostownikowych i podstacji ( $\epsilon \leq 8\%$ ) przy możliwie wysokich napięciach pracy jałowej.

Z uwagi na rosnące koszty energii wydaje się celowym rozważenie upowszechnienia stosowania urządzeń typu «kontroler mocy szczytowej» w podstacjach trakcyjnych, ale poza liniami najwyższej kategorii, gdzie wymagane jest pewne zasilanie.

PKP jest odbiorcą energii o zasięgu ogólnokrajowym zaliczanym do odbiorów dużych, posiada też koncesję na hurtowy obrót energią. Uzyskanie koncesji należy uznać za duże osiągnięcie w dążeniu do minimalizacji kosztów energii, pozwala bowiem na hurtowy zakup energii po niższych cenach niż te ujęte w cennikach spółek dystrybucyjnych. Efekty z tytułu posiadania uprawnień do obrotu byłyby znacznie większe w sytuacji posiadania przez PKP własnych sieci rozdzielczych.

W wyniku analiz przeprowadzonych w projekcie [9] należy uznać, że dążenie do budowy w ramach modernizacji linii kolejowych własnych linii przesyłowych 110 kV, pomimo związanych z tym kosztów (porównywalnych z kosztami modernizacji linii 15 kV i doinstalowania transformatorów WN/SN w stacjach energetycznych) jest jak najbardziej właściwe i przyszłościowe. Przedsięwzięcia takie zainicjowano na liniach CMK, E20.

3. Wiele europejskich zarządów kolejowych posiada własne linie elektroenergetyczne wysokich napięć i udziały w spółkach wytwórczych energii (elektrownie). Łączna długość tych linii bywa większa od długości zelektryfikowanych linii kolejowych w takich krajach, jak Włochy, Niemcy, Austria, Francja. Podążanie PKP tą właśnie drogą ma zatem uzasadnienie. Hurtowy zakup energii i własne sieci dystrybucyjne wysokich napięć pozwalają na:

- minimalizację cen zakupu energii,

- minimalizację strat przesyłowych energii,
- podniesienie niezawodności zasilania,
- uzyskiwanie dodatkowych korzyści z obrotu energią poza PKP,
- minimalizację kosztów opłat za moc bierną i zakłócenia wprowadzane do sieci (wyższe harmoniczne, wahania napięcia).

□

#### .Literatura

- [1] Capasso A., Guidi-Bufferini G., Morelli V. Mierzejewski L., Szeląg A., Wach A.: *Potenziamento del sistema di alimentazione della linea ferroviaria Varsavia-Kunowice-Berlin Mostra Convegno – La Tecnologia del Trasporto su Ferro e L'orientamento al Mercato*. 27–28 Novembre, 1998, Napoli, ITALY.
- [2] Mierzejewski L.: *Modernizacja układu zasilania trakcji elektrycznej na linii CMK dla prędkości jazdy pociągów  $v = 200 \div 250$  km/h*. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna *Linie dużych prędkości na PKP*. Mąchocice-Ameliówka, 30.09–1.10.1997.
- [3] Mierzejewski L., Szeląg A.: *Racjonalizacja zużycia energii w systemach zasilania trakcji elektrycznej*. III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna *Gospodarka Paliwami i energią w przedsiębiorstwie PKP*. Zakopane, 3–5 grudnia 1997.
- [4] Mierzejewski L.: *Energochłonność przewozów w odniesieniu do kategorii pociągów*. VIII Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'98.
- [5] Mierzejewski L., Szeląg A.: *Ground transportation systems (w) The Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering, Supplement 1*) John Wiley & Sons, NY, USA, 2000, pp. 169–194.
- [6] Mierzejewski L., Szeląg A. i inni: *Ocena układu zasilania linii CMK pod kątem wprowadzenia prędkości jazdy pociągów 250 km/h i wstępna analiza wprowadzenia jednostopniowej transformacji napięcia w podstacjach trakcyjnych tej linii*. Praca niepublikowana Zakładu Trakcji Elektrycznej IME PW na rzecz DG PKP, 1996–1997.
- [7] Mierzejewski L., Szeląg A., Galuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. WPW 1989.
- [8] Mikuła E., Freliszka J., Mierzejewski L.: *Koncepcja zasilania linii E-20 na odcinku Warszawa-Terespol na poziomie 110kV*. SEMTRAK'98.
- [9] Raport Projektu KBN PBZ 28-07. *Racjonalizacja zużycia energii w transporcie kolejowym*. Wykonawcy: Politechnika Warszawska, CNTK, CBSiPBK „Kolprojekt”, Warszawa, 1999.
- [10] Szeląg A.: *Kryteria, standardy techniczne oraz zagadnienia jakości energii elektrycznej w projektowaniu układów zasilania elektroenergetyki kolejowej systemu 3 kV*. Technika Transportu Szynowego 12/2000.
- [11] Urbanek R., Mierzejewski L.: *Optymalizacja rozdziału obciążeń w układzie zasilania linii kolejowej przy użyciu algorytmów genetycznych*. SEMTRAK'98.
- [12] Wdowiak J., Mierzejewski L., Szeląg A.: *Projektowanie systemu zasilania trakcji elektrycznej. Podstacje trakcyjne*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 1993.

Autorzy  
dr inż. Leszek Mierzejewski  
dr inż. Adam Szeląg

Zakład Trakcji Elektrycznej Politechnika Warszawska