

## WYBRANE PROBLEMY OGRANICZANIA STRAT MOCY I ENERGII W SIECIACH DYSTRYBUCYJNYCH

Janusz BROŻEK<sup>1</sup>, Wojciech BĄCHOREK<sup>2</sup>

1. AGH Akademia Górniczo – Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel: 12 617 3772 fax: 12 634 57 21 e-mail: jbroz@agh.edu.pl
2. AGH Akademia Górniczo – Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel: 12 617 2599 fax: 12 634 57 21 e-mail: wojbach@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Stacje transformatorowe średniego napięcia na niskie napięcie (SN/nn) spełniają podobną rolę w sieciach niskiego napięcia jak główne punkty zasilania (GPZ) w sieci średniego napięcia. Budowa nowej stacji transformatorowej SN/nn zmienia warunki pracy elektroenergetycznej sieci rozdzielczej na danym terenie poprzez:

- zmniejszenie długości ciągów sieci dystrybucyjnej nn,
- zmiany w rozplywie prądów,
- zmniejszenie spadków napięcia,
- zmniejszenie strat mocy i energii w istniejącym układzie,
- zwiększenie pewności zasilania.

W referacie przedstawiono wyniki obliczeń strat mocy i energii dla różnych stanów pracy sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia. Do analizy strat mocy i energii w sieci rozdzielczej nn zastosowano model liniowy sieci. Praca stanowi kontynuację tematu zawartego w pracy [1].

**Słowa kluczowe:** elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna, straty mocy i energii.

### 1. STRATY MOCY I ENERGII

Dodatkowe stacje transformatorowe SN/nn „skracają” drogi zasilania do odbiorców zasilanych z sieci niskiego napięcia nn, co wpływa na poziom strat mocy i energii w tej sieci.

Do analizy strat mocy i energii w sieci niskiego napięcia zastosowano model liniowy sieci (równomiernie obciążenie wzdłuż torów sieci) [1], [2].

Poszczególne parametry charakteryzujące analizowaną sieć testową obliczano z następujących zależności:

- równomierne rozłożone obciążenie jednostkowe  $p_n$  (liniowa gęstość obciążenia),

$$p_n = \frac{P_c}{l_c} = \frac{P_z}{l_{sr}} \quad (1)$$

- straty mocy  $\Delta P$  w linii,

$$\Delta P = \frac{P_n^2 l_c^3 \times 10^3}{3 \gamma s U^2 \cos^2 \varphi} \delta_p \quad (2)$$

- minimalny przekrój  $s$  przewodu:

$$s = \frac{P_n l_c^2 \times 10^5}{2 \gamma \Delta U U^2} \delta_u \quad (3)$$

- obciążenie obwodu  $S_{max}$ ,

$$S_{max} = \frac{P_c}{\cos \varphi} k_j = \frac{n P_z}{\cos \varphi} k_j \quad (4)$$

- straty energii w przewodach i w transformatorach  $\Delta E$ ,

$$\Delta E = \left( l_n \Delta P + P_k \left( \frac{S_{max}}{S_n} \right)^2 \right) \tau + P_0 T_p \quad (5)$$

- jednostkowe straty energii  $\Delta E_{jed}$ ,

$$\Delta E_{jed} = \frac{\Delta E}{n} \quad (6)$$

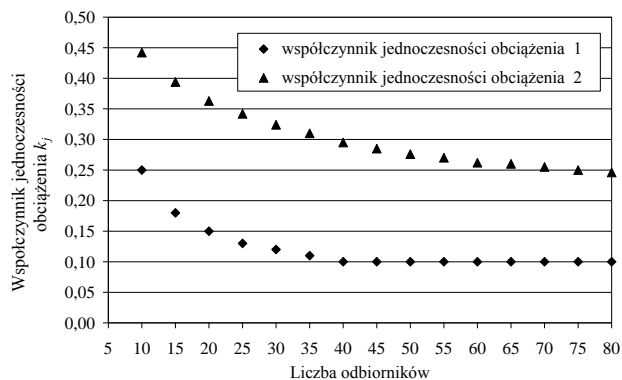
- czas trwania strat maksymalnych  $\tau$ ,

$$\tau = \frac{2}{3} T_s \quad (7)$$

gdzie:  $P_c$  – całkowita moc obwodu [kW];  $P_z$  – moc odbioru w szczycie obciążenia linii (taka sama dla wszystkich odbiorców) [kW];  $k_j$  – współczynnik jednoczesności szczytów obciążenia (zależny od liczby zasilanych odbiorców);  $n$  – liczba odbiorców [szt.];  $l_c$  – długość obwodu [m];  $l_{sr}$  – średnia odległość między odbiorcami [m];  $\gamma$  – przewodność właściwa [m/( $\Omega$ mm<sup>2</sup>)];  $U$  – napięcie międzyfazowe [V];  $\Delta U$  – dopuszczalny spadek napięcia [%];  $\cos \varphi$  – współczynnik mocy odbioru (taki sam dla wszystkich odbiorców);  $T_s$  – czas użytkowania mocy szczytowej [h/a];  $T_p$  – czas pracy urządzenia pod napięciem [h/a];  $l_n$  – liczba linii nn zasilanych z transformatora [szt.];  $S_{max}$  – maksymalne obciążenie obwodu [kVA];  $S_n$  – moc znamionowa transformatora [kVA];  $P_k$  – znamionowe straty w uzwojeniach transformatora [kW];

$P_0$  – straty jałowe transformatora [kW],  $\delta_p$  – współczynnik poprawkowy do obliczania strat mocy (zależny od liczby zasilanych odbiorców),  $\delta_u$  – współczynnik poprawkowy do obliczania minimalnego przekroju (zależny od liczby zasilanych odbiorców).

Przyjęcie modelu liniowego sieci nn umożliwia obliczenie strat mocy i energii przy znajomości tylko prądu wpływającego do sieci (bez konieczności znajomości obciążenia szczytowego poszczególnych odbiorców).



Rys. 1. Zależność współczynnika jednoczesności obciążenia  $k_j$  od liczby odbiorców, krzywa 1 wg [3] krzywa 2 wg [4]

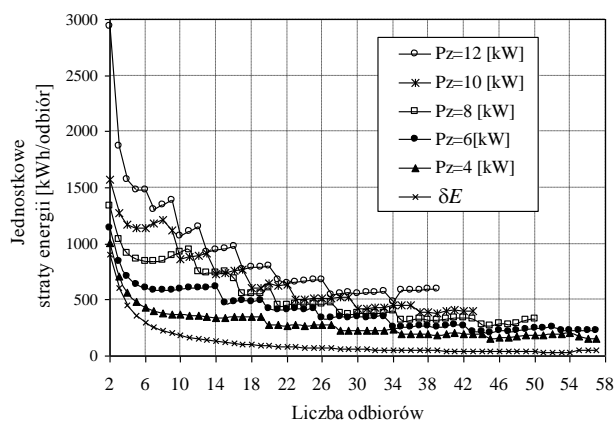
Niejednoczesność występowania obciążenia szczytowego odbiorców uwzględnia się stosując do obliczeń współczynnik jednoczesności obciążenia  $k_j$ . Od wartości współczynników  $k_j$  znacząco zależą wyliczane wartości strat mocy i energii. Na rysunku 1 przedstawiono cytowane w literaturze [3], [4] wartości współczynnika  $k_j$ .

## 2. WPLYW LICZBY ZASILANYCH ODBIORCÓW NA WIELKOŚĆ STRAT MOCY I ENERGII

Dla przedstawionego modelu obliczono jednostkowe straty energii  $\delta E$  (straty energii w liniach i transformatorze przypadające na jednego odbiorcę) w zależności od liczby zasilanych odbiorców, dla następujących danych:  $\tau = 2\ 100$  h,  $l_n = 2 \times l_{sr} = 40$  [m], liczba odbiorców  $n \in (2 \div 58)$ ,  $k_i$ ,  $\delta_p$ ,  $\delta_u$  – współczynniki dobierane wg [3], [4], [5],  $T_p = 8\ 760$  [h/a]. Przekroje dobierano według zależności (3) ze zbioru przekrojów znamionowych  $s \in \{16, 25, 35, 70, 95, 120\}$  mm<sup>2</sup> [1]. Obciążenie transformatorów SN/nn obliczano z zależności (4), moc znamionową dobierano ze zbioru transformatorów o mocach znamionowych  $S_n \in \{50, 100, 160\}$  [1]. Obliczenia wykonano dla mocy jednostkowych odbiorców  $P_z \in \{4, 6, 8, 10, 12\}$  kW/odb. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku podano dodatkowo zależność jednostkowych strat energii stanu jałowego transformatora  $\delta E$  (na jednego odbiorcę).

Przebieg zależności strat jednostkowych w sieci zasilającej (transformator + linie) od liczby przyłączonych odbiorców jest uwarunkowany stratami energii stanu jałowego w transformatorze  $\Delta E_j$ . Dla małej liczby odbiorców straty te są dominujące. W miarę zwiększania liczby odbiorców wzrastają straty obciążeniowe w transformatorze i liniach. Powyżej pewnej liczby odbiorców (dla analizowanego przykładu 18÷22 odbiorców) funkcja strat jednostkowych ma przebieg prawie płaski (straty wolno maleją ze wzrostem ilości odbiorców), co związane jest z dominacją strat obciążeniowych w całkowitych stratach energii.

Charakterystyczne „schodki” na wykresach (rys. 2) są spowodowane zmianą przekroju przewodów linii oraz zmianą mocy transformatora.



Rys. 2. Jednostkowe straty energii w sieci zasilającej (transformator SN/nn + linie nn) w funkcji ilości odbiorców, dla różnych mocy jednostkowych odbiorców  $P_z$  (średnia odległość między odbiorcami;  $l_{sr} = 40$  m; liczba linii wychodzących z transformatora  $l_n = 2$ ;  $\delta E$  jednostkowe straty energii stanu pracy jałowej transformatora)

Otrzymane wyniki wskazują, że dla ograniczenia jednostkowych strat energii w sieci o strukturze liniowej należy unikać zasilania zbyt małej liczby odbiorców. W analizowanym przykładzie liczba przyłączonych odbiorców powinna być większa od 18÷22.

## 3. WPLYW DODATKOWEJ STACJI TRANSFORMATOROWEJ NA WIELKOŚĆ STRAT MOCY I ENERGII

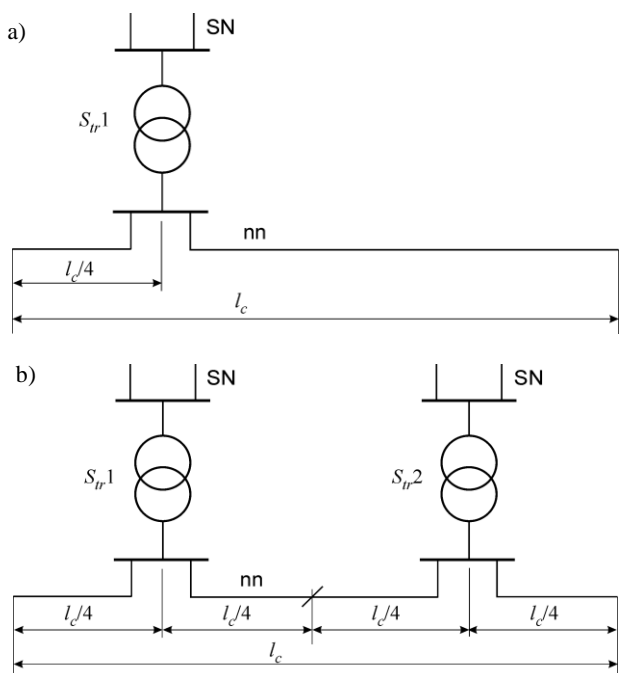
Na rysunku 3a przedstawiono układ napowietrznej sieci rozdzielczej nn o obciążeniu równomiernie rozłożonym wzdłuż toru zasilającego odbiory wiejskie lub podmiejskie. Badano wpływ budowy dodatkowej stacji transformatorowej SN/nn (rys. 3b) na poziom strat energii w transformatorach i w linii. Obliczenia wykonano korzystając z modelu liniowego [2]. Obliczono również prosty okres zwrotu nakładów na budowę stacji transformatorowej wynikający z zysku osiągniętego z tytułu ograniczenia strat.

Obliczenia prowadzono przy założeniach:

- każdy odbiór pobiera taką samą moc  $P_z$ ,
- odbiory oddalone są o stałą średnią odległość  $l_{sr}$ ,
- dla wszystkich odbiorców przyjmujemy jednakowy  $\cos \varphi$ ,
- na całej długości  $l_c$  zakładamy jednakowy przekrój linii  $s$ ,
- do obliczeń przyjmujemy liniowy równomierny rozkład obciążenia wzdłuż linii na długości  $l_c$ .

Obliczenia wykonano dla następujących danych: długość toru  $l_c = 1500$  [m]; średnia odległość między odbiorcami  $l_{sr} \in \{15, 20, 30, 40, 50, 60\}$  [m]; liczba odbiorców  $n \in (25 \div 75)$ ; współczynnik mocy  $\cos \varphi = 0,93$ ; jednostkowa moc odbioru  $P_z \in \{2 \div 12\}$  [kW/odbior]; przekrój przewodu  $s = 50$  [mm<sup>2</sup>] Al.; współczynnik jednoczesności szczytów obciążenia  $k_j = 0,3$ ; współczynnik poprawkowy dla obliczeń strat mocy  $\delta_p = 0,1$ ; współczynnik dla obliczeń skorygowanego przekroju  $\delta_u = 0,33$ ; koszt

inwestycyjny napowietrznej stacji transformatorowej  $K_I = 36\,440$  [zł] (przeciętne koszty inwestycyjne napowietrznej stacji transformatorowej i transformatora o mocy 100 kVA); jednostkowy koszt strat energii  $k_{AE} = 0,20$  [zł/kWh]; jednostkowy koszt strat mocy  $k_{Ap} = 80$  [zł/(kW·a)]; czas trwania strat maksymalnych  $\tau = 2\,100$  [h/a]; transformatory  $S_{tr\,1}$  i  $S_{tr\,2}$  o mocy  $S_n = 100$  [kVA] [1].



Rys. 3. Schemat elektroenergetycznej sieci rozdzielczej zasilającej odbiory: a) stan istniejący; b) stan po dobudowaniu dodatkowej stacji SN/nn

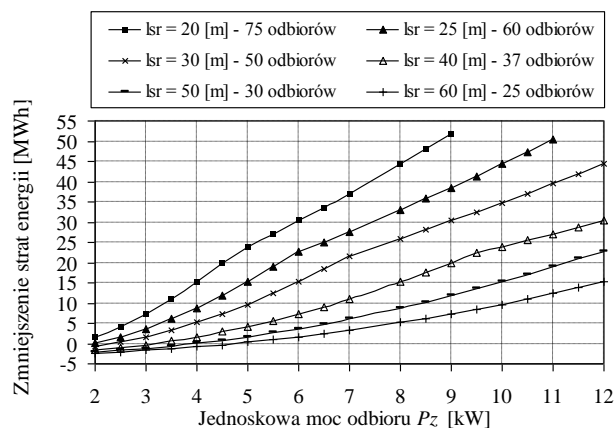
Obliczenia wykonano dla stanu wyjściowego (stacja transformatorowa  $S_{tr\,1}$  zasilająca odbiory) oraz po podziale głównego toru na dwa odcinki i dodaniu stacji transformatorowej  $S_{tr\,2}$ . W obliczeniach wykorzystano zależności: na straty mocy w układzie (2), minimalny przekrój przewodu (3), obciążenie obwodów (4), straty energii (5).

W obliczeniach nie uwzględniono kosztów ewentualnej dobudowy linii SN lub nn. Do oceny ekonomicznej budowy drugiego transformatora zastosowano uproszczony wskaźnik opłacalności inwestycji (prosty okres zwrotu nakładów  $SPP$ ):

$$SPP = \frac{K_{tr}}{Z} \quad (8)$$

gdzie:  $K_{tr}$  – koszt inwestycyjny transformatora [zł],  $Z$  – zysk z tytułu zmniejszenia strat energii po zainstalowaniu drugiego transformatora [zł/rok].

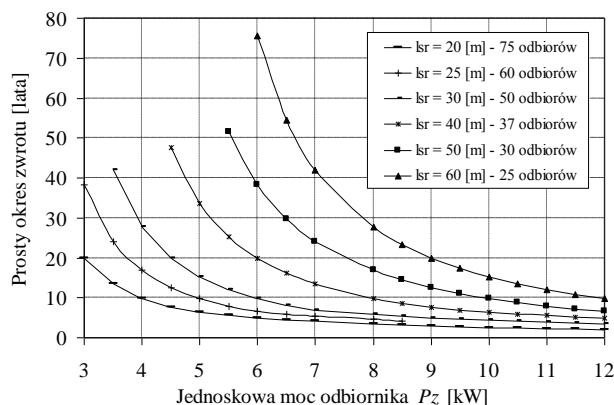
Na rysunku 4 przedstawiono wyniki obliczeń zmian strat energii po wybudowaniu dodatkowej stacji. Z rysunku 4 wynika, że przy niewielkiej gęstości obciążenia liniowego  $p_n = P_z/l_{sr}$  (dla analizowanego przykładu  $p_n < 0,08$  kW/m) straty w układzie zasilania z jednym transformatorem są mniejsze niż w układzie z dwoma transformatorami (bilans strat jest ujemny). W takim przypadku nie istnieją warunki zwrotu kosztów budowy dodatkowego transformatora z tytułu zmniejszenia strat energii.



Rys. 4. Ilość oszczędzonej energii  $\Delta E$  po wybudowaniu dodatkowej stacji transformatorowej SN/nn w funkcji obciążenia jednostkowego odbioru  $P_z$ , dla różnych średnich odległości między odbiorami, czas trwania strat maksymalnych  $\tau = 2\,100$  h/a, całkowita długości linii nn,  $l_c = 1\,500$  m

Na rysunku 5 przedstawiono zależność prostego okresu zwrotu nakładów na budowę stacji transformatorowej w funkcji obciążenia jednostkowego  $P_z$  dla różnych średnich odległości  $l_{sr}$  pomiędzy odbiorami.

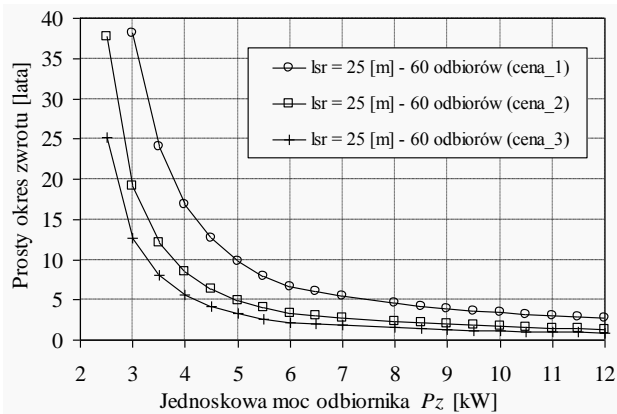
Z rysunku 5 wynika, że dla przyjętego czasu trwania strat maksymalnych  $\tau = 2\,100$  [h/a] prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych ( $SPP$ ) jest mniejszy od 5 lat dla gęstości obciążenia liniowego  $p_n > 0,30$  kW/m (np.  $P_z = 6$  kW,  $l_{sr} = 20$  m;  $P_z = 7,5$  kW,  $l_{sr} = 25$  m).



Rys. 5. Zależność prostego okresu zwrotu kosztów budowy stacji transformatorowej SN/nn  $SPP$  od jednostkowego obciążenia odbiorów  $P_z$  dla różnych średnich odległości  $l_{sr}$  (długość całkowita obwodu nn  $l_c = 1\,500$  [m]; czas trwania strat maksymalnych  $\tau = 2\,100$  [h/a])

Wykonano również obliczenia prostego okresu zwrotu kosztów budowy stacji transformatorowej SN/nn  $SPP$ , dla różnych wartości jednostkowego kosztu strat energii  $k_{AE}$  i jednostkowego kosztu strat mocy  $k_{Ap}$ . Badania wykonano dla następujących wartości kosztów jednostkowych strat energii:

cena\_1 –  $k_{AE} = 0,20$  [zł/kWh];  $k_{Ap} = 80$  [zł/(kW·a)],  
cena\_2 –  $k_{AE} = 0,40$  [zł/kWh];  $k_{Ap} = 160$  [zł/(kW·a)],  
cena\_3 –  $k_{AE} = 0,60$  [zł/kWh];  $k_{Ap} = 240$  [zł/(kW·a)] oraz średniej odległości między odbiorami  $l_{sr} = 25$  [m] (60 odbiorów). Pozostałe parametry obwodu nie uległy zmianie. Wyniki przedstawiano na rysunku 6.



Rys. 6. Zależność prostego okresu zwrotu kosztów budowy stacji transformatorowej SN/nn SPP od jednostkowego obciążenia odbiorów  $P_z$ , dla następujących wartości kosztów jednostkowych strat mocy i energii: cena\_1 –  $k_{AE} = 0,20$  [zł/kWh];  $k_{Ap} = 80$  [zł/(kW·a)], cena\_2 –  $k_{AE} = 0,40$  [zł/kWh];  $k_{Ap} = 160$  [zł/(kW·a)], cena\_3 –  $k_{AE} = 0,60$  [zł/kWh];  $k_{Ap} = 240$  [zł/(kW·a)] i średniej odległości  $l_{sr} = 25$  [m], całkowitej długości obwodu nn  $l_c = 1500$  [m]; czasu trwania strat maksymalnych  $\tau = 2$  100 [h/a]

Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że w warunkach rzeczywistych może wystąpić takie obciążenia jednostkowe  $P_z$  odbioru i średnia odległości  $l_{sr}$  między odbiorami, dla których prosty okres zwrotu kosztów SPP budowy stacji transformatorowej SN/nn jest mniejszy od 5 lat (rys. 5). Należy również zauważyć że spodziewana podwyżka cen energii w najbliższych latach spowoduje, że wzrośnie opłacalność budowy dodatkowych stacji SN/nn wynikających z potrzeby ograniczenia strat mocy i energii (rys. 6).

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Obliczenia wykazały, że budowa dodatkowego punktu zasilania SN/nn zazwyczaj prowadzi do zmniejszenia strat mocy i energii.

Decyzję o nowych inwestycjach podejmuje się, zwykle z powodów innych niż ograniczenie strat mocy. Towarzyszące tym inwestycjom zmniejszenie strat mocy jest argumentem dodatkowym za podjęciem takiej decyzji.

### SELECTED PROBLEMS OF MINIMIZING POWER AND ENERGY LOSS IN DISTRIBUTION NETWORKS

**Key-words:** electric power distribution network, power and energy loss.

In the paper there are presented selected methods of minimizing power and energy loss in low-voltage networks feeding rural and suburban areas. The analysis is carried out with the use of a linear model of the network with a uniform power load along the network tracks. In order to decrease the energy loss (per one recipient) in a network with linear load (Fig. 2) one should avoid the feeding of too small a number of loads from one MV/LV transformer station (the number of connected loads should exceed 18-22). The calculations have shown that the construction of an additional feeding point usually leads to the decrease of the power and energy loss.

Dla ograniczenia jednostkowych strat energii (na jednego odbiorcę) w sieci o obciążeniu równomiernym (rys. 3) należy unikać zasilania zbyt małej liczby odbiorów z jednej stacji transformatorowej SN/nn. W analizowanych przykładach liczba przyłączonych odbiorów powinna być większa od  $18 \div 22$ .

Z przeprowadzonych obliczeń (rys. 5, 6) wynika, że czasy zwrotu nakładów na budowę stacji transformatorowej krótszy niż 5 lat jest możliwy dla gęstości obciążenia liniowego  $p_n$  o wartości większej niż 0.30 kW/m (rys. 5).

Przeprowadzone badania (rys. 4, 5, 6) wskazują na pilną potrzebę badań w celu aktualizacji stanu obciążenia obwodów nn w rejonach podmiejskich i wiejskich w celu określenia aktualnej wartości współczynnika jednoczesności obciążenia  $k_j$ .

Zastosowana metoda obliczeniowa bazuje na uproszczonym modelu sieci elektroenergetycznej. W najbliższej przyszłości upowszechnienie technologii *smart metering* umożliwi bieżący pomiar obciążenia sieci i zastosowanie do obliczeń strat mocy i energii dedykowanego programu.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Praca zbiorowa pod red. Jerzego Kulczyckiego: Straty energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych, Poznań PTPiRE 2009, ISBN 978-83-925667-1-7.
2. Kahl T. Sieci elektroenergetyczne, Warszawa WNT 1984, ISBN 83-204-0261-1.
3. Zbiór przepisów technicznych dotyczących projektowania i wykonania robót elektryfikacji rolnictwa. Zjednoczenie, Elektryfikacji i Zaopatrzenia Rolnictwa i Wsi w Wodę, Wyd. IV, Warszawa 1994.
4. Zoworka G.: Wyznaczanie i przewidywanie zapotrzebowania mocy szczytowej przez wiejskich odbiorców energii elektrycznej. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Opolu, seria Studia i Monografie, Opole 1992, ISSN 0239-6718.
5. Gładkowskiego F.: Nowe zasady przyjmowania obciążeń w zagrodach oraz obliczenia sieci nn i stacji transformatorowej, Biuletyn informacyjny, z. 77, Krajowe Zrzeszenie Elektryfikacji Rolnictwa, Warszawa, 1984.