

Marian PASKO  
Krzysztof DĘBOWSKI

## WSKAŹNIK WYBORU OPTIMALNEJ SYMMETRIZACJI N-FAZOWYCH OBWODÓW

**Streszczenie.** Celem artykułu jest przedstawienie zasad symetryzacji niesymetrycznego odbiornika N-fazowego zasilanego z symetrycznego źródła napięcia odkształconego okresowego. Symetryzację przeprowadza się za pomocą dwójników reaktancyjnych LC.

## SELECTION INDEX FOR OPTIMUM SYMMETRIZATION IN N-PHASE NETWORKS

**Summary.** The aim of the paper is to present rules for symmetrization of asymmetrical N-phase network supplied from symmetrical nonsinusoidal voltage source. Symmetrization is carried out by means of reactance LC one-ports.

## УКАЗАТЕЛЬ ОТБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ СИММЕТРИЗАЦИИ N-ФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

**Резюме.** Целью работы является симметрирование нагрузки на фазы идеального N-фазного источника несинусоидального напряжения с помощью двухполюсников.

## 1. WSTĘP

Idea symetryzacji niesymetrycznych odbiorników trójfazowych zasilanych z idealnego źródła napięcia odkształconego okresowego została opisana w pracach [3], [4], [6]. Uogólnienie symetryzacji na układy N-fazowe N+1 przewodowe zostało podane w pracy [5]. W pracy [5] nie dyskutowano jednoznaczności rozwiązań. Dla układów trójfazowych trójprzewodowych jak i czteroprzewodowych otrzymano rozwiązania w postaci analitycznej. Otrzymane rozwiązania były jednoznaczne. Dla układów N-fazowych nie otrzymuje się rozwiązań jednoznacznych. Ponadto prowadzone rozważania bardzo się komplikują, a wyniki można otrzymać na drodze numerycznej. Można wykazać, że dla N-fazowego układu otrzymuje się  $\binom{2N-3}{N}$  różnych rozwiązań. Istnieje zatem potrzeba skonstruowania odpowiedniego wskaźnika optymalnego rozwiązania i temu poświęcony jest między innymi niniejszy artykuł.

## 2. SFORMUŁOWANIE I ROZWIĄZANIE PROBLEMU

Problem symetryzacji dla układu przedstawionego na rys.1 może być sformułowany podobnie, jak to uczyniono w pracach [3], [4], [5], [6]:

Niesymetryczny odbiornik N-fazowy liniowy (rys.1) opisany dla rozpatrywanych harmonicznych pełną macierzą impedancji  $Z_h$  (która jest nieosobliwa) zasilany z idealnego źródła napięcia odkształconego okresowego należy doprowadzić za pomocą dwójników LC włączonych na napięcia międzyfazowe (układ symetryzujący z rys.1) do układu symetrycznego przy rozpatrywaniu od strony zacisków źródła. Sformułowany problem symetryzacji sprowadza się do tego, aby macierz admitancji fazowych widzianych z zacisków źródła dla każdej rozpatrywanej harmonicznej była macierzą cykliczną. Stawiane jest ponadto wymaganie, aby dla każdej harmonicznej po dołączeniu układu symetryzującego ze źródła nie była pobierana moc bierna.

W stosunku do N-fazowego źródła zakłada się na wstępie, że jest ono idealne i symetryczne w kolejności zgodnej dla podstawowej harmonicznej, tzn.:

$$e_b(t) = e_a(t - \frac{T}{N}); e_c(t) = e_b(t - \frac{T}{N}); \dots; e_n(t) = e_a(t + \frac{T}{N}),$$



Z założenia, że macierz  $Z_h$  jest macierzą nieosobliwą, równanie (2) można zapisać w postaci:

$$\begin{bmatrix} I_{abh} \\ I_{bch} \\ \vdots \\ I_{nah} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{aah} & Y_{abh} & \dots & Y_{anh} \\ Y_{bah} & Y_{bbh} & \dots & Y_{bnh} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{nah} & Y_{nbh} & \dots & Y_{nnh} \end{bmatrix}}_{Y_h} \begin{bmatrix} U_{abh} \\ U_{bch} \\ \vdots \\ U_{nah} \end{bmatrix} \quad (3)$$

przy czym  $Y_h = Z_h^{-1}$ .

W celu przeprowadzenia symetryzacji układu za pomocą dwójników LC włączonych w sposób pokazany na rys.1 (układ symetryzujący) należy w pierwszym rzędzie macierz admitancji równania (3) doprowadzić do macierzy diagonalnej, tzn. doprowadzić do uzależnienia prądu danej fazy od napięcia tej samej fazy. W tym celu po wyznaczeniu z równania (3) wartości prądów  $I_{abh}, I_{bch}, \dots, I_{nah}$  poszukiwane wartości admitancji macierzy diagonalnej wyznacza się na podstawie zależności:

$$Y_{ABh} = \frac{I_{abh}}{U_{abh}}, \quad Y_{BCh} = \frac{I_{bch}}{U_{bch}}, \quad \dots, \quad Y_{NAh} = \frac{I_{nah}}{U_{nah}}, \quad (4)$$

przy czym macierz diagonalna  $Y_{DIAGh}$  ma postać:

$$Y_{DIAGh} = \begin{bmatrix} Y_{ABh} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{BCh} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{NAh} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Diagonalizacji macierzy  $Y_h$  można dokonać dla wszystkich harmonicznych z wyjątkiem tych, dla których w składowych symetrycznych napięć źródłowych występuje składowa zerowa, gdyż wówczas  $E_{ah}=E_{bh}=\dots=E_{nh}$ , co powoduje  $U_{abh}=E_{ah}-E_{bh}=0$ ,  $U_{bch}=E_{bh}-E_{ch}=0, \dots, U_{nah}=E_{nh}-E_{ah}=0$ , a w konsekwencji  $I_{abh}=I_{bch}=\dots=I_{nah}=0$ .

Dla tych harmonicznych problem symetryzacji nie występuje.



Natomiast dla pozostałych harmonicznych pełną macierz admitancji odbiornika typu wielokąt można zawsze zastąpić odpowiednią macierzą diagonalną.

Ogólnie można napisać:

$$\begin{bmatrix} I_{abh} \\ I_{bch} \\ \vdots \\ I_{nah} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ABh} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{BCh} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{NAh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{abh} \\ U_{bch} \\ \vdots \\ U_{nah} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Nasuwa się pytanie, jakie warunki muszą spełniać admitancje  $Y_{ABh}$ ,  $Y_{BCh}$ , ...,  $Y_{NAh}$  dla kolejnych harmonicznych, aby odpowiednie składowe symetryczne napięcie źródła wywoływały te same składowe symetryczne prądy przewodowych, co jest warunkiem symetrii impedancyjnej układu.

W tym celu napięcie międzyfazowe wyraża się za pomocą napięć fazowych oraz prądy przewodowe za pomocą prądów fazowych odbiornika.

Równanie (6) przyjmuje wtedy postać:

$$\begin{bmatrix} I_{ah} \\ I_{bh} \\ I_{ch} \\ \vdots \\ I_{nh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{ABh} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{BCh} & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & Y_{CDh} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & Y_{NAh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ah} \\ E_{bh} \\ E_{ch} \\ \vdots \\ E_{nh} \end{bmatrix} \quad (7)$$

**UMJ**

gdzie: **IMJ** - macierz przekształcenia prądów;

**UMJ** - macierz przekształcenia napięć.

Równanie (7) można zapisać dla każdej harmonicznej w postaci macierzowej:

$$\mathbf{I}_p = \mathbf{I} \mathbf{M} \mathbf{J} \cdot \mathbf{Y}_{\text{DIAG}} \cdot \mathbf{U} \mathbf{M} \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}_r \quad (8)$$

Po przejściu na składowe symetryczne napięcie i prądów równanie (8) przyjmuje postać:

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{I} \mathbf{M} \mathbf{J} \cdot \mathbf{Y}_{\text{DIAG}} \cdot \mathbf{U} \mathbf{M} \mathbf{J} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{E}_s, \quad (9)$$

gdzie:  $\mathbf{S}^{-1}$ ,  $\mathbf{S}$  - odpowiednio macierz odwrotna składowych symetrycznych i macierz składowych symetrycznych, która dla układu N-fazowego ma postać:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \alpha^{-1} & \alpha^{-2} & \dots & \alpha^{-(N-1)} \\ 1 & \alpha^{-2} & \alpha^{-4} & \dots & \alpha^{-2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \alpha^{(N-1)} & \alpha^{-2(N-1)} & \dots & \alpha^{-(N-1)(N-1)} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

gdzie:  $\alpha = \exp(j\frac{2\pi}{N})$ ;  $\alpha^{-1} = \exp(-j\frac{2\pi}{N})$ .

Ponieważ obwód jest N-fazowy N-przewodowy, wobec tego w składowych symetrycznych prądów przewodowych kolejności zerowej  $I_0=0$ .

Po przekształceniu równania (9) można uzyskać ogólne związki o postaci:

$$\begin{aligned} \bigwedge_h I_1 &= g_1(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}) E_{1h} + \sum_{k=2}^{N-1} f_{1,k}(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}) E_{kh}, \\ I_2 &= g_2(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}) E_{2h} + \sum_{k=3}^{N-1} f_{2,k}(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}) E_{kh} + \\ &\quad + f_{2,1}(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}) E_{1h}, \quad (11) \\ I_{N-1} &= g_{N-1}(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}) E_{N-1,h} + \sum_{k=1}^{N-2} f_{N-1,k}(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}) E_{kh}, \end{aligned}$$

gdzie:  $f_{j,k}(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh})$  - funkcje admitancji  $Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}$  dla  $j$ -tej składowej symetrycznej prądu od  $k$ -tej składowej symetrycznej napięcia,  $j \neq k$ ,

$g_j(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh})$  - funkcje admitancji  $Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}$  dla  $j$ -tej składowej symetrycznej prądu od  $j$ -tej składowej symetrycznej napięcia.

Warunkiem symetryzacji obwodu jest spełnienie warunków:

$$\bigwedge_h f_{j,k}(Y_{ABh}, Y_{BCh}, \dots, Y_{NAh}) = 0. \quad (12)$$

Oczywiście w przypadku ogólnym warunki postaci (12) nie są spełnione. Aby je spełnić, należy do obwodu włączyć dwójniki symetryzujące LC, jak pokazano na rys.1. Wówczas równanie obwodu ma postać:

$$\begin{bmatrix} I_{abh} \\ I_{bch} \\ \vdots \\ I_{nah} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{ABh} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{BCh} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{NAh} \end{bmatrix}}_{Y_{Z,DIAG}} + j \begin{bmatrix} {}_k B_{abh} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & {}_k B_{bch} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & {}_k B_{nah} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{abh} \\ U_{bch} \\ \vdots \\ U_{nah} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Po przejściu na prądy przewodowe i napięcia fazowe oraz wyrażeniu ich przez ich składowe symetryczne otrzymuje się zmodyfikowane warunki symetryzacji analogiczne do warunków w postaci (12).

Jak podano w założeniach, stawia się również wymaganie, aby po dołączeniu układu symetryzującego dla każdej rozpatrywanej harmonicznej ze źródła nie była pobierana moc bierna, czyli:

$$\begin{aligned} \bigwedge_h (|U_{abh}|^2 B_{ABh} + |U_{bch}|^2 B_{BCh} + \dots + |U_{nah}|^2 B_{NAh}) = \\ = - (|U_{abh}|^2 {}_k B_{abh} + |U_{bch}|^2 {}_k B_{bch} + \dots + |U_{nah}|^2 {}_k B_{nah}) \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie:  $B_{ABh} = \text{Im}\{Y_{ABh}\}$ ,  $B_{BCh} = \text{Im}\{Y_{BCh}\}, \dots, B_{NAh} = \text{Im}\{Y_{NAh}\}$ .

Ponieważ zachodzi:  $|U_{abh}| = |U_{bch}| = \dots = |U_{nah}|$ , więc warunek (14) przyjmuje postać:

$$\bigwedge_h (B_{ABh} + B_{BCh} + \dots + B_{NAh}) = -(k B_{abh} + k B_{bch} + \dots + k B_{nah}). \quad (15)$$

Dla układu złożonego z  $N$ -faz otrzymuje się  $2N-3$  równań o  $N$  niewiadomych susceptancjach dwójników symetryzujących (występuje  $N$ -składowych symetrycznych - stąd z rozdzielania części rzeczywistej i urojonej otrzymuje się  $2N$  równań, minus 2 równania składowej zerowej (część rzeczywista i urojona), minus 2 równania składowej wynikającej z harmonicznej, która pozostaje (część rzeczywista i urojona), plus jedno równanie zerowego poboru mocy biernej ze źródła dla każdej rozpatrywanej harmonicznej po dołączeniu układu symetryzującego - łącznie  $2N-3$  równań o  $N$  niewiadomych), można zatem otrzymać

$\binom{2N-3}{N}$  różnych rozwiązań.

### 3. WSKAŹNIK WYBORU OPTYMALNEGO ROZWIĄZANIA

Wybór jednego z  $\binom{2N-3}{N}$  rozwiązań pociąga za sobą pominięcie niektórych równań jako mniej znaczących, a co za tym idzie nieskompensowanie udziału niektórych składowych. Wobec tego należy dokonać wyboru takiego rozwiązania, które z punktu widzenia pewnego kryterium zapewni najlepszą symetryzację układu.

Definicja takiego kryterium jest sprawą dyskusyjną i może się zmieniać wraz ze zmianą warunków pracy układu.

Przyjęte kryterium zostało określone jako iloraz składowej symetrycznej prądu po kompensacji wynikającej ze składowej symetrycznej napięcia dla danej harmonicznej  $|I_{ih}|(|E_{ih}|)$  do sumy wszystkich składowych symetrycznych prądu po kompensacji, przy czym na potrzeby tego kryterium wyznacza się moduły odpowiednich składowych, a następnie sumuje się je:

$$K = \frac{|I_{ih}|(|E_{ih}|)}{\sum_{k=0}^{N-1} |I_{kh}|}, \quad (16)$$



gdzie:  $i = 1$  - dla harmoniczných  $h=N k+1$ ;  $k=0,1,2,\dots,1$ ;

$i = 2$  - dla harmoniczných  $h=N k+2$ ;

$i = N-1$  - dla harmoniczných  $h=N k+N-1$ .

Mozna zauważyć, że  $K \leq 1$  zawsze, a dla  $K=1$  osiągnięta symetryzacja jest idealna.

Jak już wspomniano wcześniej, wybór optymalnego rozwiązania pociąga za sobą pominięcie niektórych równań jako mniej znaczących, a co za tym idzie nieskompensowanie udziału niektórych składowych symetrycznych prądu. Efektem tego są występujące asymetrie prądów fazowych po przeprowadzonej symetryzacji układu - w układzie czterofazowym są to asymetrie przesunięć fazowych (zachowana jest symetria wartości skutecznych prądów), dla układów o liczbie faz większej niż cztery występują również asymetrie wartości skutecznych prądów.

Generalnie można stwierdzić, iż pełna symetryzacja dla układu o liczbie faz większej niż trzy (dla układu trójfazowego otrzymuje się trzy równania o trzech niewiadomych i pełną symetryzację) możliwa jest do przeprowadzenia dla tych układów, dla których odrzucone równania spełnią się samoistnie.

Dodatkowo okazuje się, iż dla układów o parzystej liczbie faz nie można przeprowadzić symetryzacji dla harmoniczných  $h = \frac{N}{2} + kN = (k + \frac{1}{2})N$ ,  $k = 0,1,2,\dots,1$ , gdyż otrzymana wówczas liczba równań liniowo niezależnych jest mniejsza od liczby niewiadomych wartości susceptancji dwójników symetryzujących LC, a zatem przeprowadzenie symetryzacji wg przedstawionego algorytmu w tym przypadku nie jest możliwe.

Dla układów o nieparzystej liczbie faz problem ten nie występuje. Z przedstawionych rozważań (por. wzory (11), (12), (15)) wynika, że otrzymanie wyników analitycznych na susceptancję dwójników symetryzujących w postaci analitycznej (jak to miało miejsce dla układów trójfazowych) w tym przypadku nie jest możliwe. Cały proces symetryzacji łącznie z wyborem wskaźnika optymalnego (16) przeprowadza się na podstawie odpowiednio skonstruowanego algorytmu numerycznego. Zrealizowany na podstawie tego algorytmu program komputerowy został wykorzystany do rozwiązania przedstawionego przykładu.

#### 4. PRZYKŁAD I WNIOSKI

Rozważmy układ pięciofazowy, w którym siła elektromotoryczna w fazie a ma następujący przebieg czasowy:

$$e_a(t) = \sqrt{2} \cdot 200 \cos \omega t + \sqrt{2} \cdot 50 \cos 4\omega t \text{ V}, \quad \omega = 314 \text{ rad/s},$$

natomiast parametry odbiornika przyjmują następujące wartości:

$$\text{faza a: } R_a = 1 \Omega, \quad \omega L_a = 4 \Omega,$$

$$\text{faza b: } R_b = 5 \Omega, \quad \omega L_b = 7 \Omega,$$

$$\text{faza c: } R_c = 9 \Omega, \quad \omega L_c = 2 \Omega,$$

$$\text{faza d: } R_d = 5 \Omega, \quad \omega L_d = 3 \Omega,$$

$$\text{faza e: } R_e = 6 \Omega, \quad \omega L_e = 4 \Omega.$$

Dla odpowiednich harmonicznych macierze impedancji mają postać:

$$\text{harmoniczna 1: } Z_1 = \begin{bmatrix} 1+j4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5+j7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9+j2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5+j3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6+j4 \end{bmatrix} \Omega,$$

$$\text{harmoniczna 4: } Z_4 = \begin{bmatrix} 1+j16 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5+j28 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9+j8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5+j12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6+j16 \end{bmatrix} \Omega.$$

W obwodzie bez włączonego układu symetryzującego prądy źródła mają następujące przebiegi czasowe:

$$i_a(t) = \sqrt{2} 76,4 \cos(\omega t + 315^\circ) + \sqrt{2} 3,3 \cos(4\omega t + 278^\circ) \text{ A},$$

$$i_b(t) = \sqrt{2} 44,9 \cos(\omega t + 186^\circ) + \sqrt{2} 3,8 \cos(4\omega t + 8^\circ) \text{ A},$$

$$\begin{aligned}i_c(t) &= \sqrt{2} 13,8 \cos(\omega t + 175^\circ) + \sqrt{2} 5,9 \cos(4\omega t + 67^\circ) \text{ A} , \\i_d(t) &= \sqrt{2} 47,9 \cos(\omega t + 135^\circ) + \sqrt{2} 3,7 \cos(4\omega t + 167^\circ) \text{ A} , \\i_e(t) &= \sqrt{2} 44,7 \cos(\omega t + 32^\circ) + \sqrt{2} 4,6 \cos(4\omega t + 230^\circ) \text{ A} ,\end{aligned}$$

a sam układ określają parametry:

$$\text{norma napięcia } \|u\| = 461 \text{ V},$$

$$\text{moc czynna } P = 27\,770 \text{ W},$$

$$\text{norma prądu } \|i\| = 111,5 \text{ A},$$

$$\text{moc pozorna } |S| = 51\,403 \text{ V}\cdot\text{A},$$

$$\text{współczynnik mocy źródła } \lambda = \frac{P}{|S|} = 0,54.$$

Po włączeniu (wyznaczonych w wyniku przeprowadzonej symetryzacji) dwójników symetryzujących o danych:

$$\begin{aligned}B_{ab1} &= 0,258 \text{ S} , & B_{ab4} &= 0,048 \text{ S} , \\B_{bc1} &= 0,070 \text{ S} , & B_{bc4} &= 0,069 \text{ S} , \\B_{cd1} &= -0,017 \text{ S} , & B_{cd4} &= 0,067 \text{ S} , \\B_{de1} &= 0,081 \text{ S} , & B_{de4} &= 0,045 \text{ S} , \\B_{ea1} &= 0,125 \text{ S} , & B_{ea4} &= 0,047 \text{ S} ,\end{aligned}$$

prądy źródła mają następujące przebiegi czasowe:

$$\begin{aligned}i'_a(t) &= \sqrt{2} 28,9 \cos(\omega t + 358^\circ) + \sqrt{2} 0,6 \cos(4\omega t + 6^\circ) \text{ A} , \\i'_b(t) &= \sqrt{2} 26,6 \cos(\omega t + 291^\circ) + \sqrt{2} 2,7 \cos(4\omega t + 85^\circ) \text{ A} , \\i'_c(t) &= \sqrt{2} 27,1 \cos(\omega t + 212^\circ) + \sqrt{2} 1,7 \cos(4\omega t + 105^\circ) \text{ A} , \\i'_d(t) &= \sqrt{2} 28,6 \cos(\omega t + 146^\circ) + \sqrt{2} 1,8 \cos(4\omega t + 254^\circ) \text{ A} , \\i'_e(t) &= \sqrt{2} 25,6 \cos(\omega t + 71^\circ) + \sqrt{2} 2,7 \cos(4\omega t + 273^\circ) \text{ A} ,\end{aligned}$$

natomiast parametry całego układu przyjmują wartości:

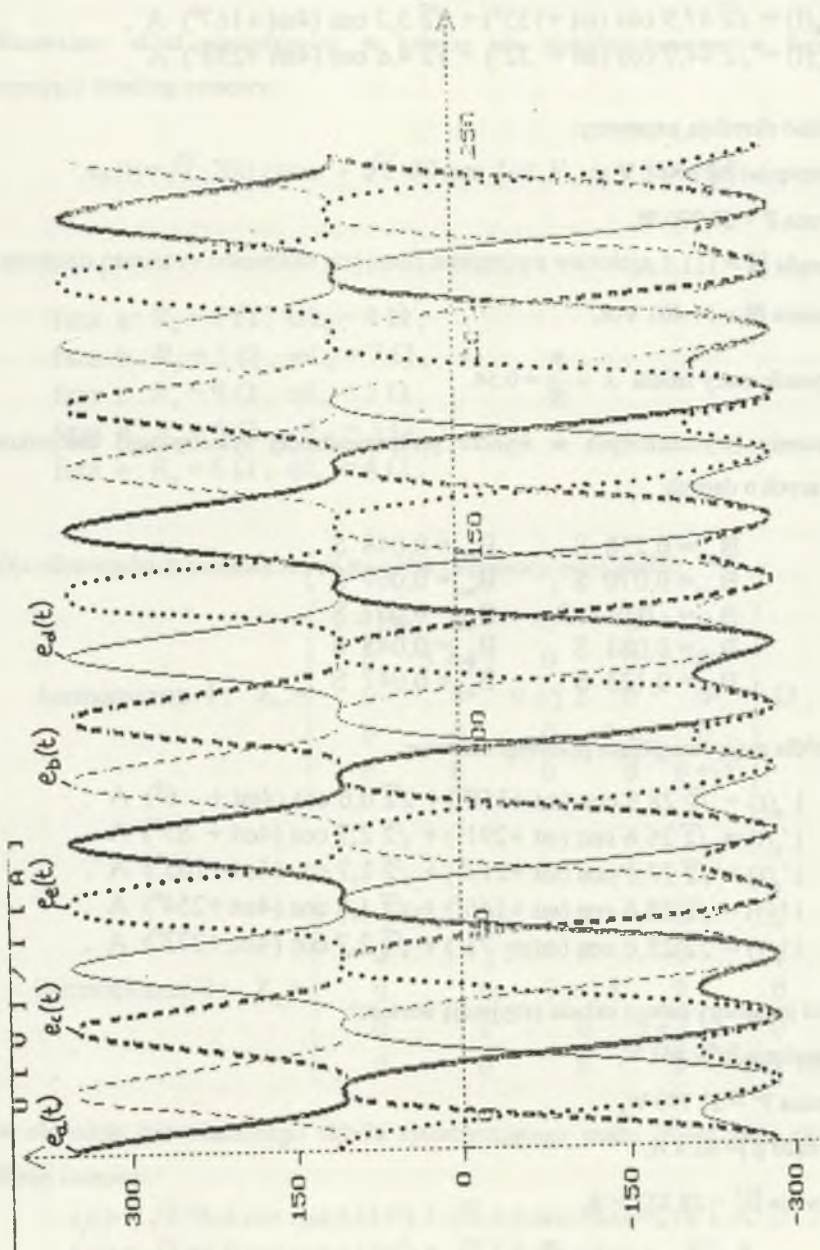
$$\text{norma napięcia } \|u'\| = 461 \text{ V},$$

$$\text{moc czynna } P' = 27\,770 \text{ W},$$

$$\text{norma prądu } \|i'\| = 61,4 \text{ A},$$

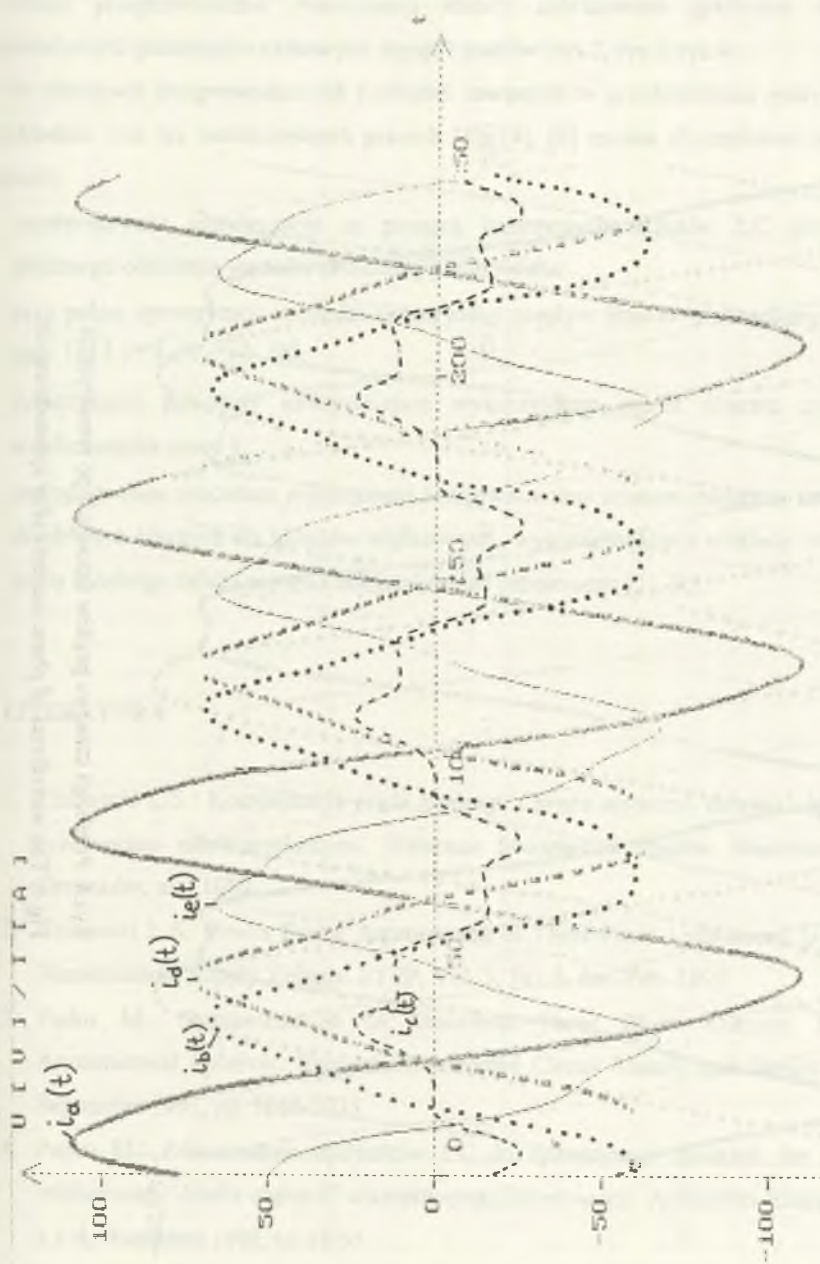
$$\text{moc pozorna } |S'| = 28\,322 \text{ V}\cdot\text{A},$$

$$\text{współczynnik mocy źródła } \lambda' = \frac{P'}{|S'|} = 0,98 > \lambda.$$



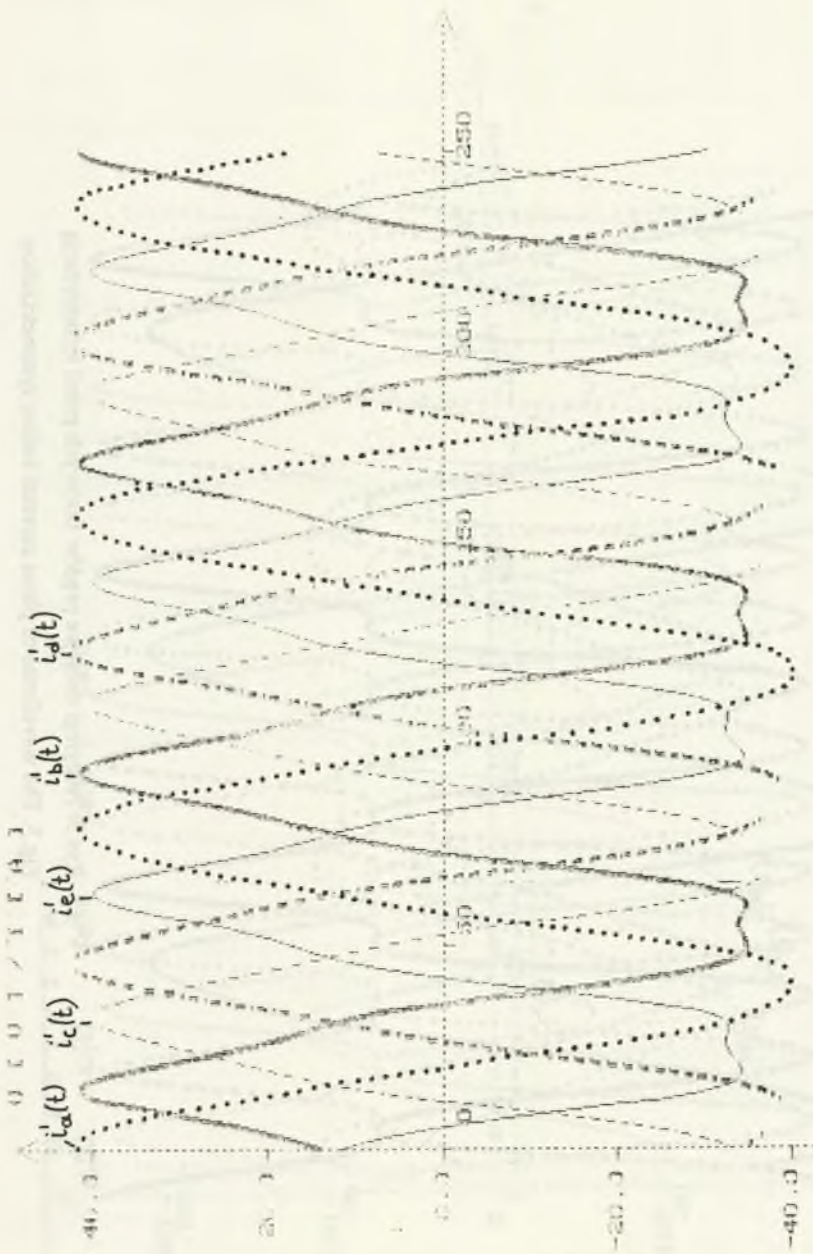
Rys.2. Przebiegi czasowe napięć fazowych źródła  
 Fig.2. The waveforms of phases voltages of the source





Rys.3. Przebiegi czasowe prądów fazowych przed symetryzacją

Fig.3. The waveforms of phase currents before symmetrization



Rys.4. Przebiegi czasowe prądów fazowych po symetryzacji

Fig.4. The waveforms of phase currents after symmetrization

Efekty przeprowadzonej symetryzacji zostały zobrazowane graficznie w postaci przykładowych przebiegów czasowych napięć i prądów (rys.2, rys.3, rys.4).

Na podstawie przeprowadzonych rozważań zawartych w przedstawionej pracy łącznie z przykładem oraz we wcześniejszych pracach [3], [4], [6] można sformułować następujące wnioski:

- zaproponowana symetryzacja za pomocą bezstratnych układów LC prowadzi do znacznego obniżenia wartości skutecznej prądu źródła;
- przy pełnej symetryzacji zachodzi symetryczny rozptyw prądów przewodowych źródła, tzn.  $i_b(t) = i_a(t - \frac{T}{N})$  itd.
- symetryzacja powoduje efektywniejsze wykorzystanie źródła poprzez zwiększenie współczynnika mocy  $\lambda$ ,
- zaproponowana procedura symetryzacji jest równoważna znanym metodom kompensacji składowych biernych dla układów trójfazowych, wykorzystujących rozkłady ortogonalne prądu idealnego źródła napięcia odkształconego okresowego [1], [2].

## LITERATURA

1. Czarnecki L.S.: Kompensacja prądu biernego i prądu asymetrii układu 3-fazowego z przebiegami niesinusoidalnymi. Wiosenne Seminarium Prądów Niesinusoidalnych, Drzonków, maj 1989.
2. Czarnecki L.S.: Power Factor Improvement of Three-Phase Unbalanced Loads With Nonsinusoidal Supply Voltage. ETEP, Vol. 3, No. 1, Jan./Feb. 1993.
3. Pasko M.: Symmetrization of Deformed Three Phase Currents Supplying Asymmetrical Receiver. European Conference Circuit Theory and Design, Lyngby, September 1991, pp. 1068-1075.
4. Pasko M.: Zastosowanie dwójników LC do symetryzacji obciążeń faz idealnego trójfazowego źródła napięcia odkształconego okresowego. Archiwum Elektrotechniki z.1-4, Warszawa 1992, ss. 85-97.
5. Pasko M.: Application of LC One-Ports in Phase Load Symmetrization in N-Phase Systems With Nonsinusoidal Periodical Waveforms. European Conference Circuit Theory and Design, Davos, Switzerland, September 1993, pp. 1159-1164.

6. Pasko M.: Dobór kompensatorów optymalizujących warunki pracy źródeł napięć jednofazowych i wielofazowych z przebiegami okresowymi odkształconymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z.135, Gliwice 1994 (monografia habilitacyjna).

Recenzent: Prof.dr inż. Stanisław Bolkowski

Wpłynęło do Redakcji 11 kwietnia 1994 r.

### Abstract

The aim of the paper is to present principles of symmetrization of N-phase, N-wire systems supplied from the sources of periodical nonsinusoidal voltages. Symmetrization for freely chosen finite number of harmonics is carried out by LC one-ports. The problems presented here continue previous papers on symmetrization of 3-phase systems [3], [4], [6]. For three-phase and three-wire systems as well as four - wire systems the solutions are explicit and it is possible to obtain full symmetrization of phase load. Considerations for N-phase systems lead to unexplicit solutions. In general these solutions do not ensure full symmetrization. To define effectiveness of symmetrization, an optimizing index in the sense of formula (16) has been introduced. Selection of the solution for the optimum symmetrization is possible only in a numerical way. The considerations presented have been illustrated with an example.