

Dr hab. inż. Janusz WALCZAK
Dr hab. inż. Marian PASKO
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej
Politechniki Śląskiej

METODY OPTIMALIZACYJNE W TEORII MOCY OBWODÓW Z PRZEBIEGAMI NIESINUSOIDALNYMI

Streszczenie. Artykuł jest próbą charakterystyki prac prowadzonych w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej w latach 1986-1994 dotyczących właściwości obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi. Na tle istniejących teorii mocy, często niespójnych, przedstawiono podejście optymalizacyjne dla wyjaśnienia właściwości energetyczno-jakościowych wymienionych obwodów.

Teorie opisu właściwości energetycznych układów z przebiegami odkształconymi rozwijały się w Instytucie od czasów prof. S. Fryzego. Teoria prof. Fryzego i jej uogólnienia należą obok teorii C. I. Budeanu do najbardziej rozpowszechnionych. Następnie przez wiele lat były prowadzone prace z teorii mocy przez prof. Z. Nowomiejskiego i Jego współpracowników.

Szukano nowych ujęć poprzez wprowadzenie rozkładów ortogonalnych, definicji mocy biernych, które byłyby powszechnie akceptowane tak jak np. moc czynna P .

Niestety poszukiwania te nie zostały zakończone pełnym sukcesem. Niepowodzenia te przyczyniły się do poszukiwania rozwiązań na drodze optymalizacyjnej, której ogólne podejście zostało zaprezentowane w niniejszym artykule.

OPTIMIZATION METHODS IN THE POWER THEORY OF THE CIRCUITS WITH NONSINUSOIDAL WAVEFORMS

Summary. This is an attempt of characterization of the works that have been carried out in the Institute of Theoretical and Industrial Electrotechnics of the Silesian Technical University of Gliwice during the period 1986-1994 concerning properties of the circuits with nonsinusoidal waveforms. The way of optimization for explanation of energetical-qualitative properties of the networks has been shown on the background of existing power theories there are often inconsistent. The works on the description of the circuits with nonsinusoidal periodic waveforms started in the Institute at Prof. Fryze's times. Prof. Fryze's theory and its generalization are with the Budeanu's theory two the most commonly used. In the subsequent years the works on power theory have been carried out by Prof. Z. Nowomiejski and his partners. The new ways have been used by means of introduction of orthogonal decomposition, definitions of reactive power, that could be as commonly accepted as, for example, average power P . Those attempts however did not achieve complete success. This was the reason of trying of the optimization way, which has been here presented.

1. WSTĘP

Problematyka dotycząca zagadnień związanych z opisem, identyfikacją, analizą i modyfikacją właściwości obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi jest bardzo obszerna, tym niemniej możliwa jest umowna klasyfikacja tych zagadnień na cztery sprzężone ze sobą grupy tematyczne.

Grupy te obejmują prace dotyczące:

- wyboru wielkości służących do opisu właściwości obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi i metod analizy tych obwodów,
- metod modyfikacji obwodów prowadzących do redukcji zniekształceń przebiegów i strat mocy w obwodach,
- projektowania i konstrukcji układów umożliwiających eliminację zniekształceń przebiegów i obniżenie strat mocy, czyli projektowania tzw. kompensatorów,
- metod pomiaru i konstrukcji układów pomiarowych wielkości charakteryzujących obwody z przebiegami niesinusoidalnymi.

Prace dotyczące dwóch pierwszych grup tematycznych mają charakter teoretyczno-podstawowy, natomiast prace dotyczące pozostałych grup zagadnień mają najczęściej charakter aplikacyjny. Na rozpiętość tematyki opublikowanych i prowadzonych prac wpływają niewątpliwie przyczyny natury technicznej związane z instalowaniem w systemach elektroenergetycznych nieliniowych źródeł i odbiorników energoelektronicznych i wynikłe stąd problemy poprawy efektywności wykorzystania źródeł, redukcji wyższych harmonicznych i strat mocy, związane ściśle ze sposobami rozliczeń pomiędzy wytwórcami a odbiorcami energii elektrycznej.

Z uwagi na dużą rozpiętość tematyki i dużą liczbę publikowanych prac (co najmniej kilkaset rocznie) dotyczących wymienionej problematyki, kompleksowa jej charakterystyka w ramach pojedynczego artykułu jest niemożliwa i niecelowa.

Celem artykułu jest (poprzedzona wstępem historycznym) próba charakterystyki prac prowadzonych w IETiP Pol. Śl. w latach: 1986-1994, dotyczących obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi i mieszczących się w obszarze dwóch pierwszych (wymienionych na wstępie) grup tematycznych.

Prace dotyczące obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi są prowadzone w IETiP Pol. Śl. od momentu jego powstania: początkowo przez prof. S. Fryzego (do 1964 r.), następnie przez prof. Z. Nowomiejskiego i dr hab. L. Czarneckiego (do 1986 r.). Obecnie problematyką dotyczącą obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi zajmują się prof. M. Brodzki, autorzy artykułu i dr M. Umińska-Bortliczek.

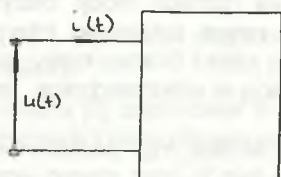
Przeładowy charakter i duża rozpiętość omawianych w artykule zagadnień nie pozwalają na zachowanie ścisłego formalizmu matematycznego i cytowanie wielu prac źródłowych. Tylko najważniejsze z tych prac zostały uwzględnione w spisie literatury dołączonym do artykułu. W artykule w zasadzie rozpatruje się obwody z przebiegami okresowymi i niesinusoidalnymi. Uogólnienie tych rozważań na obwody z przebiegami należącymi do innych klas sygnałów opisano w pracy [8] oraz w rozdziale piątym artykułu. Ze względu na ograniczoną objętość pracy nie umiesz-

czono w niej przykładów ilustracyjnych, które dostępne są w publikacjach wyszczególnionych w wykazie literatury.

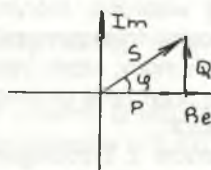
2. MOCE W OBWODACH Z PRZEBIEGAMI SINUSOIDALNYMI

Dla dwójnika (rys. 1a):

a)



b)



Rys. 1. Element dwuzaciskowy

opisanego parą przebiegów sinusoidalnych $(u(t), i(t))$:

$$\begin{aligned} u(t) &= \sqrt{2} |U| \cos(\omega t + \alpha), \\ i(t) &= \sqrt{2} |I| \cos(\omega t + \beta), \end{aligned} \quad (1)$$

definiuje się następujące moce:

- chwilową $p(t)$:

$$p(t) = u(t) i(t), \quad (2)$$

- symboliczną S :

$$\begin{aligned} S = P + jQ &= |U| |I| \cos \varphi + j |U| |I| \sin \varphi, \\ \varphi &= \alpha - \beta, \end{aligned} \quad (3)$$

- czynną P oraz bierną Q ,

- pozorną $|S|$:

$$|S| = |U| |I| = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (4)$$

oraz współczynnik mocy λ :

$$\lambda = \cos \varphi = \frac{P}{|S|}. \quad (5)$$

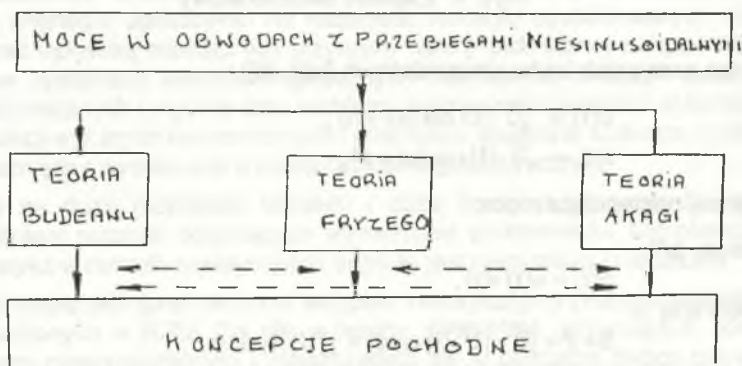
W podobny sposób określa się moce dla elementu wielozaciskowego. Wszystkie wymienione moce posiadają poprawną interpretację fizyczną, w szczególności moc bierna Q jest miarą zwrotnego przepływu energii pomiędzy elementami obwodów. Moce: czynna, bierna i symboliczna spełniają zasady zachowania i są wyko-

szystywane w bilansach energetycznych obwodów. Dla układów z przebiegami sinusoidalnymi wprowadzone moce są ogólnie akceptowane w elektrotechnice i wykorzystywane do opisu właściwości energetycznych obwodów.

3. MOCE W OBWODACH Z PRZEBIEGAMI NIESINUSOIDALNYMI

Opis właściwości energetycznych obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi stanowi jeden z najbardziej kontrowersyjnych problemów elektrotechniki. Istnieje kilkadziesiąt wielkości, którym przypisuje się nazwy różnych mocy, nazywanych ogólnie mocami "nieczynnymi". Kontrowersyjne, a nawet sprzeczne interpretacje fizyczne tych mocy, które (najczęściej) nie spełniają zasad bilansu mocy, stanowią podstawową przyczynę uniemożliwiającą ich akceptację w elektrotechnice, jak i w jej zastosowaniach.

Dla obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi istnieją trzy podstawowe koncepcje opisu właściwości energetycznych obwodów (rys.2) oraz szereg wzajemnie przenikających się koncepcji pochodnych.



Rys. 2. Klasyfikacja koncepcji źródłowych w teorii mocy

Koncepcje mocy bazujące na teoriach C. I. Budeanu i S. Fryzego dotyczą obwodów z przebiegami okresowymi i niesinusoidalnymi, które najczęściej występują w praktyce. Koncepcje mocy opierające się na teorii H. Akagiego (oraz podobnych pracach uczonych rosyjskich) wykorzystują kontrowersyjne pojęcia "chwilowych mocy biernych" i dotyczą najczęściej obwodów z przebiegami nieokresowymi. Koncepcje te nie będą w artykule rozpatrywane.

3.1. Koncepcja Budeanu

Dla układu z rys.1 opisanego parą $(u(t), i(t))$ T-okresowych przebiegów niesinusoidalnych wyrażonych w postaci szeregów Fouriera:

$$u(t) = U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} U_h \exp(jh\omega_0 t), \quad (6)$$

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \exp(jh\omega_0 t), \quad (7)$$

gdzie:

U_h, I_h - wartości zespolone skuteczne h-tej harmonicznej napięcia $u(t)$ oraz prądu $i(t)$,

C. I. Budeanu [3] zdefiniował w 1927 r. moc czynną P i bierną Q jako superpozycję mocy czynnych i biernych wszystkich harmonicznych przebiegów $u(t), i(t)$:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} |U_h| |I_h| \cos \varphi_n, \quad (8)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} |U_h| |I_h| \sin \varphi_n. \quad (9)$$

W przeciwieństwie do układów z przebiegami sinusoidalnymi dla wymienionych mocy zachodzi nierówność (por.(4)) :

$$P^2 + Q^2 \leq |S|^2 \quad (10)$$

gdzie:

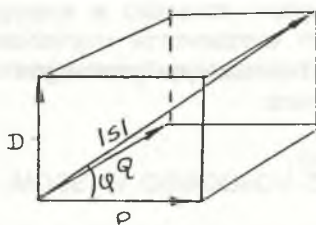
$|S|$ - moc pozorna określona wzorem:

$$|S| = \|u\| \|i\| = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} |U_h|^2 \sum_{h=0}^{\infty} |I_h|^2}. \quad (11)$$

W celu uzupełnienia nierówności (10) C. I. Budeanu wprowadził nową wielkość D nazywaną mocą deformacji, tak by:

$$P^2 + Q^2 + D^2 = |S|^2, \quad (12)$$

dzięki czemu moce P, Q, D, |S| tworzą dobrze znany prostopadłościan mocy (rys.3),



a wielkość λ :

$$\lambda = \frac{P}{|S|} = \cos \varphi \quad (13)$$

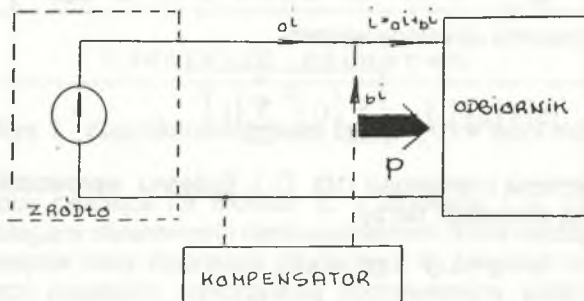
nosi nazwę współczynnika mocy.

Rys. 3. Prostopadłościan mocy
w sensie Budeanu

Niestety, wprowadzone przez C. I. Budeanu: moc bierna Q i moc deformacji D (jak i też próby uogólnienia tych definicji mocy) nie posiadają poprawnej interpretacji fizycznej [5]. Moc bierna Q nie jest miarą zwrotnego przepływu energii pomiędzy elementami obwodu a moc deformacji D nie określa zniekształceń przebiegów w obwodach, z uwagi na fakt niezdefiniowania przez C. I. Budeanu pojęcia "zniekształcenia" przebiegów. Jedyną formalną zaletą mocy biernej Q (w sensie Budeanu) jest jej zachowawczość, która niewątpliwie wpłynęła na szerokie jej rozpowszechnienie. Teoria mocy Budeanu oraz szereg koncepcji pochodnych coraz częściej są przyjmowane sceptycznie, co stanowi przyczynę rozwoju innych kierunków teorii mocy.

3.2. Koncepcja Fryzego

Zaproponowana przez S. Fryzego (1931 r.) [6] teoria mocy dotyczyła elementarnego obwodu (rys.4) złożonego z idealnego źródła napięcia i odbiornika.



Rys. 4. Układ: źródło napięcia - odbiornik

Myślą przewodnią teorii S. Fryzego był taki rozkład całkowitego prądu źródła i (rys.4) by zawierał on składnik pożądaný (w zadanym sensie) i składnik niepożądaný, który należy eliminować z prądu źródła. Według S. Fryzego składnik pożądaný prądu źródła to taki prąd, który posiada minimalną wartość skuteczną i umożliwia przy tym doprowadzenie zadanej mocy czynnej P (rys. 4) ze źródła do odbiornika. Składnik ten, oznaczony przez ${}_a i$, nazywany jest prądem aktywnym w sensie S. Fryzego. Jeżeli źródło wydaje prąd aktywny (rys. 4), to straty mocy czynnej na linii przesyłowej łączącej źródło z odbiornikiem są minimalne, a zatem sprawność energetyczna tego źródła jest największa. Eliminację zbędnego składnika prądu źródła, oznaczonego przez ${}_b i$, zapewnia dowolne (najczęściej energo-elektroniczne) źródło ładunku, dostarczające w przeciwfazie prąd ${}_b i$ do węzła pomiędzy źródłem i odbiornikiem (rys. 4).

Algorytm postępowania S. Fryzego składał się z następujących etapów:

1. Aksjomatyczne określenie prądu aktywnego ${}_a i$ źródła:

$${}_a i(t) = {}_a G u(t) \quad (14)$$

gdzie:

${}_a G$ - konduktancja zastępcza odbiornika, określona wzorem:

$${}_a G = \frac{P}{\|u\|^2} = P \left(\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \right)^{-1}, \quad (15)$$

P - moc czynna doprowadzana do odbiornika,

u - napięcie źródła.

Prąd aktywny ${}_a i$ zapewnia moc czynną P , gdyż:

$$({}_a i, u) = \frac{1}{T} \int_0^T {}_a i(t) u(t) dt = P. \quad (16)$$

2. Dekompozycja całkowitego prądu źródła i na składnik aktywny ${}_a i$ oraz składnik niepożądaný ${}_b i$:

$$i(t) = {}_a i(t) + {}_b i(t). \quad (17)$$

3. Dowód wzajemnej ortogonalności napięcia źródła u oraz prądu ${}_b i$:

$$(u, {}_b i) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) {}_b i(t) dt = 0, \quad (18)$$

pozwalający stwierdzić, że prąd ${}_b i$ nie przenosi mocy czynnej ze źródła do odbiornika.

4. Dowód wzajemnej ortogonalności prądów a_i , b_i :

$$(a_i, b_i) = \frac{1}{T} \int_0^T a_i(t) b_i(t) dt = 0 \quad (19)$$

5. Definiowanie mocy.

Ze wzoru (19) wynika, że:

$$\|i\|^2 = \|a_i + b_i\|^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (a_i(t) + b_i(t))^2 dt = \|a_i\|^2 + \|b_i\|^2 \quad (20)$$

i stąd:

$$\begin{aligned} |S|^2 &= \|u\|^2 \|i\|^2 = \|u\|^2 (\|a_i\|^2 + \|b_i\|^2) = \\ &= \|u\|^2 \|a_i\|^2 + \|u\|^2 \|b_i\|^2 = P^2 + Q_F^2 \end{aligned} \quad (21)$$

Moc Q_F określona wzorem:

$$Q_F = \left(\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \right) \left(\frac{1}{T} \int_0^T b_i^2(t) dt \right), \quad (22)$$

nosi nazwę mocy bierniej w sensie S. Fryzego.

S. Fryze interpretował moc Q_F jako miarę niepożądanego prądu b_i , rezygnując z nadania tej mocy bardziej szczegółowej interpretacji fizycznej.

Z przedstawionych rozważań wynika, że:

- wprowadzona przez S. Fryzego definicja mocy bierniej Q_F jest efektem wtórnym i podrzędnym w stosunku do dekompozycji prądu źródła,
- idea rozkładu prądu źródła na składnik pożądaną (aktywny) i niepożądaną umożliwia łatwą eliminację składnika niepożądanego (prądu b_i) za pomocą współczesnych przekształtników energoelektronicznych, bez potrzeby jego interpretacji, co jest bardzo istotne w sytuacji, gdy brak jest metod poprawnej interpretacji tego składnika,
- przedstawiona koncepcja nie wymaga stosowania metod analizy częstotliwościowej, przez co możliwe są istotne jej uogólnienia, które opisano w rozdziałach 4 i 5 artykułu.

Teoria S. Fryzego posiada również szereg wad:

1. Teoria ta obowiązuje dla obwodu z przebiegami okresowymi i niesinusoidalnymi, złożonego z idealnego źródła napięcia niesinusoidalnego i odbiornika, a zatem nie została ona sprecyzowana dla obwodów złożonych i innych klas przebiegów.
2. Teoria ta nie umożliwia oceny kształtu przebiegów.
3. Moc bierna Q_F (22) jest niezachowawcza.

Mimo wymienionych wad teoria mocy S. Fryzego jest bardzo rozpowszechniona w świecie i znane są liczne jej uogólnienia.

3. WYBRANE KONCEPCJE POCHODNE W TEORII MOCY

Modyfikacje teorii mocy C. I. Budeanu i S. Fryzego przebiegały w okresie ostatnich kilkudziesięciu lat w dwóch kierunkach:

- dekompozycji mocy biernej Q_F (22) (stanowiącej sumę geometryczną mocy biernej Q i mocy odkształcenia D w sensie Budeanu) na dalsze składniki, powiązanej z próbami nadawania im interpretacji fizycznej,
- dekompozycji prądu biernego i_b S. Fryzego (17) na dalsze składniki, połączone z definiowaniem (metodą zaproponowaną przez S. Fryzego, por. rozdz. 3.2) nowych mocy oraz próbom nadawania tym mocom interpretacji fizycznej.

Rozważania, przeprowadzone z reguły dla przebiegów okresowych i niesinusoidalnych, dotyczyły obwodu przedstawionego na rys. 4 (ewentualnie jego n-fazowego analogonu) i zaowocowały powstaniem kilkudziesięciu nowych definicji mocy. Kontrowersyjność wprowadzonych pojęć mocy spowodowała i powoduje w dalszym ciągu powstanie dużej liczby publikacji o charakterze polemicznym, które niczego nie wnoszą do teorii mocy obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi.

Poniżej opisano jedną z nowszych koncepcji mocy biernej posiadającej ograniczony sens fizyczny w wąskiej klasie układów i sygnałów, tzn. słusznej przy wszystkich ograniczeniach wymienionych powyżej.

W 1972 r. Shepherd i Zakikhani [4] zaproponowali (wykorzystując metody częstotliwościowe) rozkład całkowitego prądu źródła (rys. 4) na dwa składniki, zgodnie ze wzorem:

$$i(t) = {}_R i(t) + {}_r i(t) \quad (23)$$

gdzie:

${}_R i$ - prąd czynny, określony wzorem:

$${}_R i(t) = G_0 U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} G_h U_h \exp(jh\omega_0 t), \quad (24)$$

${}_r i$ - prąd reaktancyjny (bierny), określony wzorem:

$${}_r i(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} j B_h U_h \exp(jh\omega_0 t), \quad (25)$$

G_h, B_h - konduktancje i susceptancje liniowego odbiornika, dla h -tej harmonicznej, zasilanego ze źródła o napięciu $u(t)$, rys. 4.

Prądy ${}_R i, {}_r i$ są wzajemnie ortogonalne:

$$\|i\|^2 = \|{}_R i\|^2 + \|{}_r i\|^2, \quad (26)$$

skąd wynika natychmiast równanie mocy:

$$|S|^2 = \|u\|^2 \|{}_R i\|^2 + \|u\|^2 \|{}_i i\|^2 = S_R^2 + Q_r^2. \quad (27)$$

W równaniach (26), (27) nie występuje zarówno prąd aktywny S. Fryzego, jak i moc czynna odbiornika P.

W 1983 r. L. Czarniecki [4] zaproponował rozkład prądu ${}_R i$ (24) na dwa składniki:

$${}_R i(t) = {}_a i(t) + {}_s i(t), \quad (28)$$

gdzie:

${}_a i$ - prąd aktywny S. Fryzego (14),

${}_s i$ - prąd rozproszenia, określony wzorem:

$${}_s i(t) = (G_0 - \epsilon G) U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} (G_h - \epsilon G) U_h \exp(jh\omega_0 t). \quad (29)$$

Prąd aktywny ${}_a i$ oraz prąd rozproszenia ${}_s i$ są wzajemnie ortogonalne:

$$\|{}_R i\|^2 = \|{}_a i\|^2 + \|{}_s i\|^2 \quad (30)$$

skąd wynika równanie mocy:

$$\|S_R\|^2 = P^2 + Q_s^2, \quad (31)$$

gdzie:

Q_s - moc rozproszenia (dyspersji), określona wzorem:

$$Q_s^2 = \|u\|^2 \|{}_s i\|^2. \quad (32)$$

Z połączenia rozkładów (23), (27), (28), (31) wynika rozkład całkowitego prądu źródła na trzy składniki:

$$i(t) = {}_a i(t) + {}_r i(t) + {}_s i(t), \quad (33)$$

oraz równanie mocy:

$$|S|^2 = P^2 + Q_r^2 + Q_s^2, \quad (34)$$

określające prostopadłość mocy, różny od opisanego wzorem (12) i określonego przez C. I. Budeanu (rys. 3).

Wprowadzony przez Shepherd'a i Zakikhaniego prąd reaktancyjny ${}_r i$ (25) posiada dobrą interpretację fizyczną. Prąd ten może być zawsze wyeliminowany z całkowitego prądu źródła (zawierającego skończoną liczbę harmoniczných) za pomocą dwójnika reaktancyjnego LC (kompensatora) dołączonego do zacisków odbiornika (rys. 4). Interpretacja prądu rozproszenia ${}_s i$ (29), bazująca na pojęciu dyspersji częstotliwościowej konduktancji odbiornika jest bardzo uboga. Zgodnie z teorią S. Fryzego moce: reaktancyjna Q_r (27) i rozproszenia Q_s (32) stanowią efekt wtórny dekompozycji (33) prądu źródła i ich sens fizyczny jest dokładnie taki sam jak prądów ${}_r i$, ${}_s i$. Moce te stanowią mogą miary prądów ${}_r i$, ${}_s i$, natomiast bez powiązania z tymi prądami nie posiadają one żadnej interpretacji. Dodatkową wadą mocy Q_r , Q_s stanowi ich niezachowawczość.

Podsumowując rozważania niniejszego rozdziału, należy stwierdzić, że:

- wprowadzane definicje mocy nie posiadają jednoznacznej interpretacji fizycznej związanej z wymianą, magazynowaniem i dysypacją energii w obwodach z przebiegami niesinusoidalnymi,
- moce te są uzależnione od struktury obwodów i klasy przebiegów w nich występujących,
- wprowadzone moce nie są z reguły zachowawcze, nie mogą być więc wykorzystane do bilansów energetycznych obwodów,
- w żadnej z wprowadzonych teorii mocy nie precyzuje się pojęcia odkształcenia przebiegów, co stanowi niewątpliwą wadę tych teorii.

4. KONCEPCJA OPTYMALIZACYJNA

Z analizy wielu prac, których skromny przegląd przedstawiono w poprzednim rozdziale, wynika, że brak jest ogólnie akceptowalnych pojęć mocy "nieczynnych", które mogłyby być wykorzystane do opisu właściwości energetycznych obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi. Istnieje również pogląd, że prawidłowe zdefiniowanie pojęcia mocy bierniej dla takich obwodów jest niemożliwe oraz że nie istnieje poprawna koncepcja sposobu zdefiniowania tej mocy. Przy opisie właściwości energetycznych obwodów należy więc zrezygnować z prób (jak dotąd nieudanych) wprowadzania pojęć różnej mocy, natomiast do opisu obwodu wykorzystać te wielkości, które są powszechnie akceptowane w elektrotechnice. Koncepcję takiego podejścia do analizy energetyczno-jakościowych właściwości obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi opisano w punktach 4.1 - 4.2 artykułu.

4.1. Idea koncepcji optymalizacyjnej

Proponowane postulaty koncepcji optymalizacyjnej:

1. Do opisu właściwości energetycznych obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi wykorzystuje się wyłącznie prądy i napięcia występujące w obwodach, wartości skuteczne przebiegów oraz moc czynną.
2. Przez uogólniony prąd aktywny obwodu rozumie się zbiór prądów wyróżniony w wyniku rozwiązania odpowiedniego problemu optymalizacji warunków pracy źródeł i odbiorników energii tego obwodu.
3. Zdefiniowany dla obwodu optymalizacyjny wskaźnik jakości winien umożliwiać ocenę:
 - właściwości energetycznych przebiegów na podstawie ich wartości skutecznych i strat mocy czynnej,
 - zniekształceń przebiegów w zadanym sensie.
4. Wyróżniony zbiór prądów aktywnych określa optymalny punkt pracy obwodu, którego realizację zapewnia się przez eliminację prądów biernych w sensie

S. Fryzego, występujących w obwodzie, poprzez dołączenie do wybranych węzłów obwodu układów kompensacyjnych.

Ścisłe omówienie i uzasadnienie wymienionych postulatów wymaga wprowadzenia zaawansowanego aparatu matematycznego (por. [1], [8]) i nie jest możliwe w ramach tego artykułu.

Realizację tych postulatów przeprowadza się w dwóch krokach:

1. Optymalizacja przyjętego dla obwodu wskaźnika jakości, celem wyróżnienia zbioru prądów aktywnych, określających optymalny punkt pracy obwodu [1], [8].
2. Realizacja optymalnego punktu pracy obwodu poprzez eliminację prądów biernych (zgodnie z koncepcją S. Fryzego) polegającą na doborze odpowiednich kompensatorów [7].

Przykłady zastosowania koncepcji optymalizacyjnej opisano poniżej.

4.2. Przykłady identyfikacji optymalnych punktów pracy obwodów

Przykład 1

Dla obwodu z rys. 4 minimalizacja kwadratu wartości skutecznej prądu źródła, przy ograniczeniu na moc czynną doprowadzaną do odbiornika:

$$\min_{(i)} J_1 = \min_{(i)} \|i\|^2 = \min_{(i)} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right\}, \quad (35)$$

$$\text{gdzie: } P = (u, i) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt, \quad P - \text{zadane}, \quad (36)$$

prowadzi wprost do prądu aktywnego (14), wprowadzonego aksjomatycznie przez S. Fryzego. Właściwości tego prądu omówiono w rozdziale 3.2.; należy jednak zauważyć, że widma częstotliwościowe napięcia źródła i prądu aktywnego S. Fryzego są identyczne, z dokładnością do stałej multiplikatywnej „G” (15). Zniekształcenia tego prądu są więc takie same jak napięcia źródła.

Przykład 2

Dla obwodu z rys.4 minimalizacja funkcjonału J_2 :

$$\min_{(i)} J_2 = \min_{(i)} \left\{ \sum_{k=0}^l \rho_k \frac{1}{T} \int_0^T [i^{(k)}(t)]^2 dt \right\}, \quad (37)$$

gdzie:

$i^{(k)}$ - k-ta pochodna prądu, $k \in (0, \dots, l)$,

ρ_k ($\rho_k \geq 0$) - współczynniki wagi,

przy ograniczeniu na moc czynną odbiornika (36) prowadzi do innego prądu aktywnego, określonego wzorem:

$$i'(t) = e G'_0 U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} e G'_h U_h \exp(jh\omega_0 t), \quad (38)$$

gdzie:

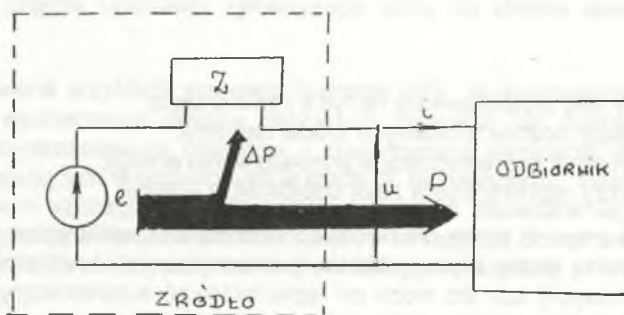
$e G'_h$ - konduktancje zastępcze odbiornika dla h-tej harmonicznej,

U_h - wartość zespolona skuteczna h-tej harmonicznej napięcia źródła (rys.4).

Prąd aktywny i' (38) realizuje kompromis (ustalony za pomocą współczynników wagi ρ_k) pomiędzy prądem źródła o minimalnej wartości skutecznej a prądem źródła o kształcie zbliżonym do przebiegu sinusoidalnego podstawowej harmonicznej napięcia źródła. Prąd taki może więc określić optymalny stan pracy obwodu z rys.4; doprowadza on zadaną moc czynną P do odbiornika, a w szczególnym przypadku, gdy: $\rho_0 = 1$, $\rho_1 = 0$, $\rho_2 = 0$, ... redukuje się do prądu S. Fryzego (14). Możliwa jest (różna od określonej wzorem (33)) ortogonalna dekompozycja całkowitego prądu źródła oraz nowy prostopadłościan mocy (por. (34)). Tworzenie tej dekompozycji oraz definiowanie nowych mocy w świetle uwag z rozdz. 3 uważa się jednak za bezcelowe.

Przykład 3

Dla obwodu złożonego ze źródła napięcia o niezerowej impedancji wewnętrznej i odbiornika (rys.5):



Rys. 5. Układ: rzeczywiste źródło napięcia - odbiornik

minimalizacja funkcjonalu J_1 (35) przy ograniczeniu na moc czynną P doprowadzaną do odbiornika:

$$P = (u, i) = \frac{1}{T} \int_0^T (e(t) - [Z i](t)) i(t) dt, \quad (39)$$

gdzie: Z - liniowy operator impedancyjny źródła,

prowadzi do nowego prądu aktywnego:

$$i_a^*(t) = e G_0^* E_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} e G_h^* E_h \exp(jh\omega_0 t), \quad (40)$$

gdzie:

- $e G_h^*$ - konduktancje zastępcze odbiornika (rys.5), dla h-tej harmonicznej,
- E_h - wartość zespolona skuteczna h-tej harmonicznej napięcia źródła.

Prąd aktywny i_a^{**} (40) redukuje się do prądu aktywnego S. Fryzego (14), gdy impedancja wewnętrzna źródła dąży do zera. Właściwości tego prądu są podobne do właściwości prądu S. Fryzego (14), z tą różnicą że jego widmo jest uzależnione od impedancji wewnętrznej źródła.

Należy zauważyć, że bezkrytyczne wykorzystywanie w wielu pracach prądu aktywnego S. Fryzego (14) do układów ze źródłami napięć o niezerowej impedancji wewnętrznej jest bezzasadne i prowadzi do błędnych rezultatów. W definicji prądu S. Fryzego występuje liniowa zależność tego prądu od napięcia na zaciskach źródła, które dla źródeł rzeczywistych nie jest niezmiennikiem układów.

Przykład 4

Dla obwodu z rys.5 minimalizacja energetyczno-jakościowego funkcjonału (37) przy ograniczeniu (39) prowadzi do innego prądu aktywnego niż poprzednio omówione. Właściwości tego prądu są podobne do prądu aktywnego (38).

Wyznaczanie prądów aktywnych możliwe jest nie tylko dla prostych obwodów, których dotyczyły poprzednie przykłady, ale również dla złożonych sieci elektrycznych [9].

Przykład 5

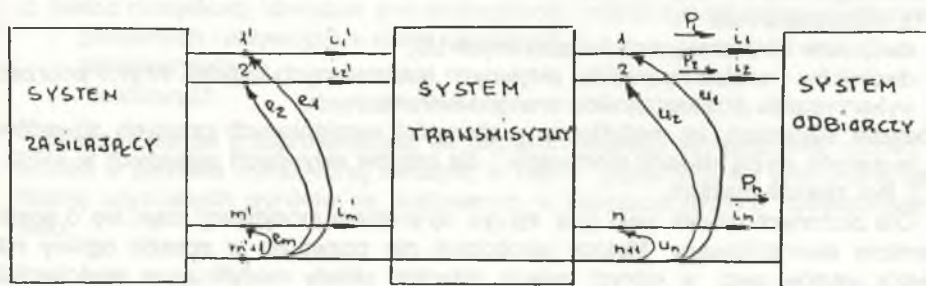
Rozpatruje się sieć przedstawioną na rys.6 i zawierającą:

- system zasilający złożony z idealnych źródeł napięcia,
- system transmisyjny pośredniczący w przekazywaniu energii,
- system odbiorczy reprezentujący zbiór odbiorników energii.

Model układu z rys. 6 może prezentować złożoną sieć elektryczną zawierającą praktycznie dowolną liczbę źródeł, układów pośredniczących i odbiorników energii (jedno i wielofazowych) lub też może on reprezentować autonomiczny układ zasilający złożony ze źródła napięcia, linii przesyłowej i odbiornika.

Minimalizacja funkcjonału J_3

$$\min_{(i_a)} J_3 = \min_{(i_a)} \left\{ \sum_{k=0}^l \rho_L \sum_{\alpha=1}^n \frac{1}{T} \int_0^T (i_a^{(k)}(t))^2 dt \right\}, \quad (41)$$



Rys. 6. Model sieci

przy ograniczeniach:

$$P_{\alpha} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\alpha}(t) i_{\alpha}(t) dt, \quad P_{\alpha} \text{ zadane}, \quad \alpha \in \{1, \dots, s\}, \quad (42)$$

$$s \leq n,$$

prowadzi do zbioru prądów aktywnych sieci $\{i_{\alpha}\}$ o właściwościach podobnych jak prądy opisane w przykładach 2, 4. W szczególności, gdy $\bigwedge_{\alpha, \beta \in \{1, \dots, s\}} P_{\alpha} = P_{\beta}$, to wymieniony zbiór prądów umożliwia symetryzację mocy po stronie układu odbiorczego (rys.6).

Przedstawione przykłady stanowią ilustrację tezy, że stosowanie metod optymalizacyjnych wyznaczania prądów aktywnych prowadzi do poprawy właściwości energetyczno-jakościowych obwodów z równoczesną eliminacją wszystkich ograniczeń występujących w omówionych w rozdz. 3 teoriach mocy. Właściwości prądów aktywnych, a w szczególności ich kształt i wartości skuteczne są determinowane przyjętym do optymalizacji wskaźnikiem jakości i mogą być dowolnie kształtowane, o ile odpowiednie problemy optymalizacji posiadają rozwiązanie.

4. 3. Modyfikacja właściwości obwodów

Realizacja optymalnego punktu pracy sieci, określonego zbiorem wyznaczonym dla niej prądów aktywnych, wymaga dołączenia do wybranych węzłów sieci odpowiednio dobranych dwójników lub wielobiegunników, nazywanych kompensatorami.

W przypadku najprostszego układu złożonego z idealnego źródła napięcia i odbiornika (rys.4) problem modyfikacji polega na dołączeniu do zacisków odbiornika, dwójnika modyfikującego impedancję obwodu widzianą z zacisków źródła, tak by źródło to wydawało pożądany prąd aktywny. Dla układu z rzeczywistym źródłem napięcia (rys.5) oraz analogonów wielofazowych obwodów z rys. 4, 5 problem modyfikacji wygląda podobnie, z tym że jako kompensatory należy rozważyć użycie

wielobiegunników. Przeprowadzona analiza możliwości modyfikacji takich obwodów [7] z wykorzystaniem:

- dwójników i wielobiegunników pasywnych LC,
- dwójników i wielobiegunników aktywnych realizowanych między innymi poprzez wykorzystanie przekształtników energoelektronicznych,

pozwala stwierdzić, że modyfikacja właściwości wymienionych prostych obwodów w opisanych wyżej klasach elementów i dla prądów aktywnych opisanych w rozdz. 4.2 jest zawsze możliwa.

Dla złożonych modeli sieci (por. np. rys. 6) problem modyfikacji staje się o wiele bardziej skomplikowany. Metody jakościowe nie pozwalają w sposób ogólny na wybór węzłów sieci, w których należy dołączać układy modyfikujące właściwości sieci (kompensatory). Zagadnienie to (jak się wydaje) można rozwiązać wyłącznie metodami symulacyjnymi (numerycznymi), analizując różne warianty przyłączenia kompensatorów do sieci. Odrębny problem stanowi wybór klasy układów wykorzystywanych do modyfikacji sieci i zapewniających przesunięcie jej pierwotnego punktu pracy do punktu optymalnego (lub też w bliskie otoczenie tego punktu), w prądowej przestrzeni stanu.

Dla prostych jedno- i wielofazowych struktur obwodów stanowiących modele autonomicznych układów zasilania (rys. 4, 5) problemy wymienione powyżej zostały w zasadzie rozwiązane z wykorzystaniem kompensatorów liniowych [7].

Analiza tych problemów sprowadza się do szeroko rozumianej syntezy obwodów [7], przeprowadzanej metodami interpolacyjnymi i optymalizacyjnymi, a omówienie tych metod (nawet w dużym skrócie) w ramach niniejszego artykułu jest niemożliwe.

Dla sieci prostych i złożonych otwarte pozostają natomiast problemy ich modyfikacji z wykorzystaniem elementów (kompensatorów) parametrycznych i nieliniowych.

Problemy te stanowią aktualne tematy badań w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej.

5. MOŻLIWOŚCI UOGÓLNIENI I AKTUALNA TEMATYKA BADAŃ

Zaprezentowana w poprzednim rozdziale koncepcja optymalizacyjna dotyczyła obwodów z przebiegami okresowymi i niesinusoidalnymi. Prowadzone od kilku lat w IETiP prace poświęcone są zastosowaniu metod optymalizacyjnych w analizie i modyfikacji obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi i mają znacznie szerszy zakres tematyczny.

Prace te dotyczą:

1. Formalizacji problemów optymalizacji wyznaczania prądów aktywnych dowolnych sieci elektrycznych o stałych skupionych, a także układów polowych, w dowolnych sygnałowych przestrzeniach Hilberta [1], [2].
2. Metod rozwiązywania konkretnych problemów optymalizacji dla:
 - obwodów z sygnałami prawieokresowymi, nieokresowymi, a także dyskretnymi,
 - złożonych struktur sieci elektrycznych,
 - różnych wskaźników jakości i różnych zbiorów ograniczeń.

3. Metod modyfikacji obwodów, a w szczególności metod syntezy kompensatorów:
- pasywnych i aktywnych w klasie układów SLS,
 - parametrycznych,
 - nieliniowych.

Niezależnie od przeprowadzonej na bieżąco symulacji komputerowej modeli obwodów w zakresie wymienionej tematyki, w 1995 r. przewiduje się praktyczną weryfikację uzyskanych wyników na budowanym w Instytucie modelu doświadczalnym sieci.

6. PODSUMOWANIE

Na zakończenie należy stwierdzić, że zastosowanie metod optymalizacyjnych umożliwia efektywną analizę właściwości energetyczno-jakościowych obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi. Metody te stanowią doskonały aparat matematyczny umożliwiający optymalizację i modyfikację stanów pracy obwodów w szeroko rozumianym sensie.

LITERATURA

1. Brodzki M.: Sformułowanie problemów wyznaczania prądów aktywnych oraz kompensacji pewnych prądów w sieciach elektrycznych. XIV SPETO, Wisła 1991, ss.65-75.
2. Brodzki M.: O pewnym problemie optymalizacji pracy sieci elektrycznych w ujęciu obwodowym i połowym. XVI SPETO, Ustroń 1993, ss.365-376.
3. Budeanu C. I.: Puissances reactives et fictives. RGE. TXXIII, 1928, pp.762-773.
4. Czarnecki L. S.: Interpretacja, identyfikacja i modyfikacja właściwości energetycznych obwodów jednofazowych z przebiegami odkształconymi. MONOGRAFIA. ZN Pol.Śl. Elektryka, Z.91, Gliwice 1984.
5. Czarnecki L.S.: Moc bierna i moc deformacji według definicji Budeanu i przyczyny bezużyteczności tych wielkości w elektrotechnice. X SPETO, Wisła 1987, ss.101-110.
6. Fryze S.: Wybrane zagadnienia teoretyczne podstaw elektrotechniki. PWN, Wrocław 1966.
7. Pasko M.: Dobór kompensatorów optymalizujących warunki pracy źródeł napięć jedno i wielofazowych z przebiegami okresowymi, odkształconymi. MONOGRAFIA. ZN Pol. Śl. Elektryka, Z.135, Gliwice 1994.
8. Walczak J.: Optymalizacja energetyczno-jakościowych właściwości obwodów elektrycznych w przestrzeniach Hilberta. MONOGRAFIA. ZN Pol. Śl. Elektryka, Z.125, Gliwice 1992.
9. Walczak J., Pasko M., Dębowski K.: Metoda wyznaczania prądów aktywnych dla pewnej klasy obwodów z przebiegami okresowymi i niesinusoidalnymi. XVII SPETO, Ustroń 1994, ss.135-141.