

Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI

Marian PASKO

ŹRÓDŁO MOCY JAKO ELEMENT TEORII OBWODÓW

Streszczenie. Zdefiniowano pojęcia idealnego źródła mocy, sterowanego źródła mocy oraz ich rodzajów. Rozpatrzono źródło mocy jako element obwodów elektrycznych oraz różne przypadki jego połączeń z innymi elementami. Pokazano także współpracę z czwórnikiem aktywnym oraz model inwertora zbudowanego na bazie dwóch sterowanych źródeł mocy. Przedstawiono elektroniczne realizacje źródeł na podstawie analogowego układu mnożącego i tranzystorowych luster prądowych. Zastosowano źródła mocy do budowy przetwornika mocy czynnej i biernej symetrycznych układów trójfazowych prądu zmiennego w moc czynną prądu stałego. Zaproponowano obwód realizujący kombinację liniową mocy czynnej i biernej do celów pomiarowych lub automatycznego sterowania urządzeniami trójfazowymi.

POWER SOURCE AS AN ELEMENT OF ACTIVE CIRCUIT THEORY

Summary. Meanings of ideal power source, controlled power source and their types, have been defined. Power source as an element of electric circuits as well as various cases of its connections with other elements have been considered. Cooperation with active two-port and a model of inverter built on the basis of two controlled power sources have been presented. Electronic realizations of power sources basing on an analog multiplier and transistor current mirrors have been shown. Power sources for building converter of active and reactive powers of symmetric alternative current three-phase systems into active and reactive powers for measurement purposes or automatic control of three-phase equipment, has been suggested.

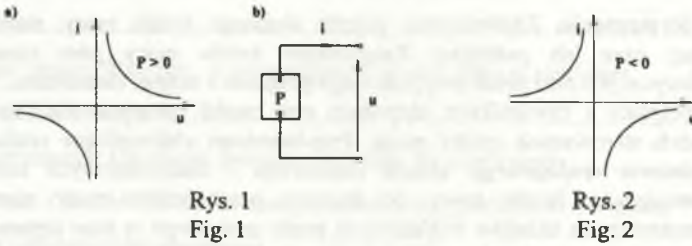
1. WSTĘP

Źródło mocy jest definiowane jako aktywny element obwodów elektrycznych [1], którego charakterystyka na płaszczyźnie i - u spełnia równanie:

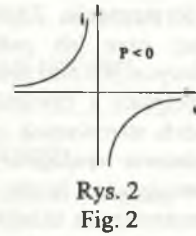
$$ui = P = \text{const}, \quad (1)$$

przy czym $|u| < \infty$, $|i| < \infty$.

Równaniu temu dla dodatniej wartości parametru P odpowiada krzywa przedstawiona na rys.1 oraz zgodnie z nią ostrzałkowany proponowany symbol źródła mocy na rys.1b.



Rys. 1
Fig. 1



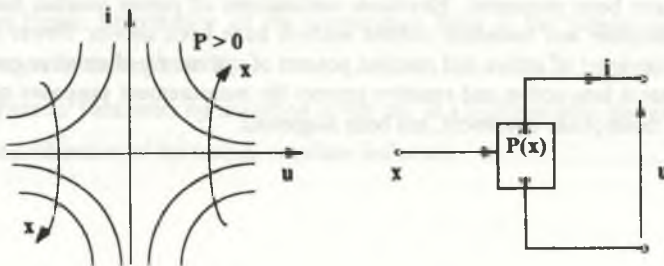
Rys. 2
Fig. 2

Dla ujemnej wartości P element ten staje się rezystancją nieliniową, o charakterystyce pokazanej na rys.2, element jest odbiornikiem mocy P .

Podobnie jak to ma miejsce dla prądowych i napięciowych źródeł sterowanych, źródło mocy może być także sterowane innymi zmiennymi obwodowymi, np. prądem, napięciem; mocą lub ich funkcjami. Opisuje je wtedy równanie:

$$ui = ax = P(x), \quad (2)$$

gdzie $x = f(i_k, u_k, p_k)$, co pokazano na rys.3.



Rys. 3
Fig. 3

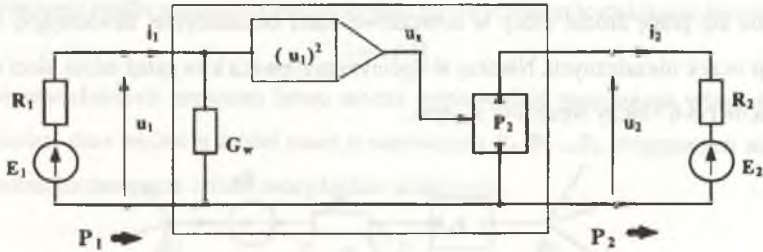
Jeżeli $x = u_1$, wtedy otrzymuje się podstawowe źródło mocy sterowane napięciem, dla którego zachodzi:

$$P_2 = u_2 i_2 = a u_1. \quad (3)$$

Włączając do wejścia sterującego źródła układ podnoszący do kwadratu otrzymujemy źródło sterowane o mocy:

$$P_2 = au_1^2 \quad (4)$$

Źródło takie o konduktancji G_w na wejściu sterującym, włączone między dwie bezinercyjne sieci liniowe, zastąpione dwójnikami źródłowymi (rys.4), jest przetwornikiem mocy pomiędzy tymi obwodami.



Rys. 4
Fig. 4

W układzie tym zachodzi:

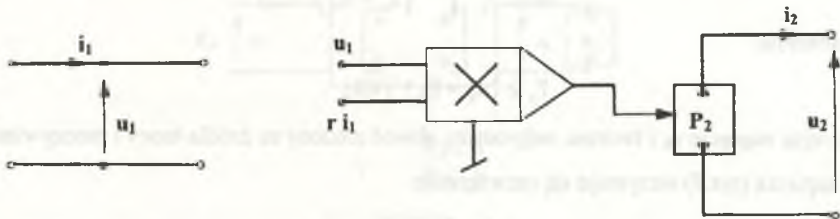
$$P_1 = u_1 i_1 = u_1^2 G_w, \quad (5)$$

$$P_2 = u_2 i_2 = au_x = au_1^2. \quad (6)$$

Stąd po wyliczeniu u_1^2 i wstawieniu do równania (6) otrzymuje się:

$$P_2 = kP_1, \quad (7)$$

gdzie $k = a/G_w$ jest współczynnikiem przenoszenia mocy między obwodami wejściowym i wyjściowym. Włączając w miejsce układu kwadratora analogowy układ mnożący uzyskuje się źródło mocy sterowane mocą w przypadku, gdy jeden z sygnałów będzie proporcjonalny do napięcia, a drugi do prądu pewnego przekroju obwodu wejściowego, co pokazano na rys.5.



Rys. 5
Fig. 5

Opisują go zależności:

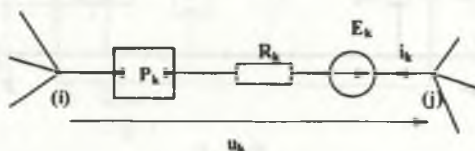
$$P_1 = i_1 u_1, \quad (8)$$

$$P_2 = ar i_1 u_1 = k P_1, \quad (9)$$

w których $k=ar$ jest współczynnikiem przenoszenia mocy.

2. ŹRÓDŁO MOCY JAKO ELEMENT OBWODU ELEKTRYCZNEGO

Zakłada się pracę źródeł mocy w α -węzłowej sieci bezinercyjnej zawierającej n gałęzi i mającej β oczek niezależnych. Niechaj w ogólnym przypadku k -ta gałąź takiej sieci ma postać pokazaną na rys.6 i łączy węzły i -ty z j -tym.



Rys. 6

Fig. 6

Opisuje ją równanie bilansu mocy o postaci:

$$R_k i_k^2 + i_k (E - u_k) - P_k = 0. \quad (10)$$

Traktując prądy i napięcia gałęziowe i_k oraz u_k jako niewiadome, całą sieć opisuje układ n równań typu (10) oraz $\alpha + \beta - 1$ równań wiążących zmienne gałęziowe na podstawie praw Kirchhoffa. Łączne rozwiązanie sumarycznego układu $n + \alpha + \beta - 1$ równań pozwala określić rozpyły prądów i rozkład napięć w badanej sieci zawierającej źródła mocy. W przypadku sieci jedno gałęziowej rozwiązanie równania (10) ma postać:

$$i_k = \frac{u_k - E_k}{2R_k} \left(\pm \sqrt{1 + \frac{4R_k P_k}{(u_k - E_k)^2}} - 1 \right) \quad (11)$$

przy założeniu:

$$P_k \geq (u_k - E_k)^2 / 4R_k.$$

Zwierając napięcie u_k i tworząc najprostszy obwód złożony ze źródła mocy i rzeczywistego źródła napięcia (rys.7) otrzymuje się rozwiązanie:

$$i = \frac{E}{2R} \left(\pm \sqrt{1 + \frac{4RP}{E^2}} - 1 \right) \quad (12)$$

dla $P \geq -E^2/4R$.



Rys. 7

Fig. 7

Dla idealnego źródła napięcia ($R=0$) otrzymuje się natychmiast rozwiązanie trywialne:

$$i = -P/E. \quad (13)$$

Z przeprowadzonych rozważań łatwo można wyprowadzić następujące własności źródeł mocy. Niechaj dane będzie n źródeł mocy o wartościach $P_1, P_2 \dots P_n$ połączonych szeregowo.

Równoważne im zastępcze źródło mocy będzie miało moc:

$$P_{SZ} = \sum_{k=1}^n P_k. \quad (14)$$

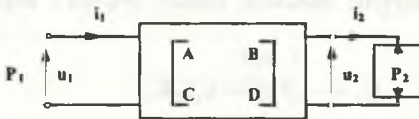
Dla połączenia równoległego tych źródeł otrzymuje się źródło zastępcze o tej samej mocy, czyli:

$$P_{RW} = \sum_{k=1}^n P_k = P_{SZ}. \quad (15)$$

3. ŹRÓDŁO MOCY A CZWÓRNIK

Włączając źródło mocy jako obciążenie liniowego czwórnik opisanego macierzą łańcuchową (rys.8) otrzymuje się moc wejściową P_1 opisaną relacją:

$$P_1 = -i_1 u_1 = (AD + BC)P_2 - ACu_2^2 - BDi_2^2. \quad (16)$$



Rys. 8

Fig. 8

Wynika z niej, że dla czwórnik aktywne typu konwerter, co oznacza $C=B=0$, zachodzi:

$$P_1 = ADP_2. \quad (17)$$

W przypadku, gdy $A=1/D$, co ma miejsce dla idealnego transformatora, $P_1=P_2$. Podobnie dla czwórnika typu inwertera, dla którego $A=D=0$ zachodzi:

$$P_1 = BCP_2 . \quad (18)$$

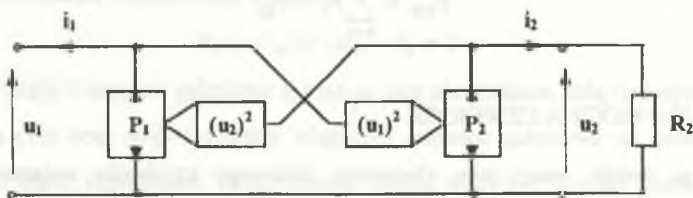
W przypadku gdy czwórnik ten jest źyratorem, czyli $B = 1/C$, wtedy także $P_1=P_2$. Zatem idealny transformator i źyrator są niezmiennikami źródła mocy.

Jeżeli w układzie źródła mocy z rys.4 dobierze się wartość konduktancji wyjściowej G_w tak, aby współczynnik przenoszenia mocy $k=1$, wtedy moc wydzielana na wyjściu jest równa mocy rozpraszanej na G_w , niezależnie od wartości parametrów obwodów dołączonych. Wypadkowy bilans mocy źródła jest wtedy zerowy, zatem układ taki można nazwać elementem rezystancyjnym nierozpraszającym energii [2].

Źródła mocowe sterowane pozwalają budować także czwórniki aktywne. Przykładem może być układ dwóch źródeł mocy sterowanych kwadratem napięcia, a połączonych w układ pokazany na rys.9. Występujące w nim źródła mocy opisują relacje:

$$P_1 = u_1 i_1 = k_1 u_2^2 , \quad (19)$$

$$P_2 = u_2 i_2 = k_2 u_1^2 = u_2^2 / R_2 . \quad (20)$$



Rys. 9

Fig. 9

Na ich podstawie można określić zależność między prądem i napięciem na zaciskach wejściowych jako:

$$G_1 = -i_1/u_1 = -k_1 k_2 R_2 . \quad (21)$$

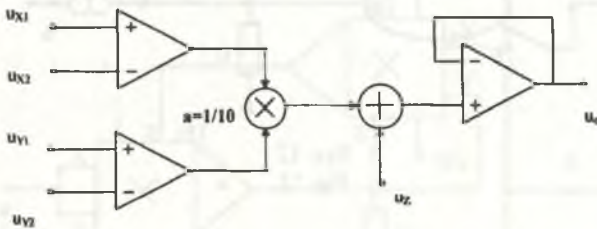
Układ ten posiada zatem własność podobną do inwertera ujemnoimpedancyjnego.

4. ELEKTRONICZNE REALIZACJE ŹRÓDEŁ MOCY

Budowa modelu źródła mocy jako elementu nieliniowego wymaga zastosowania układów elektronicznych realizujących funkcje nieliniowe. Najbardziej uniwersalne z nich są analogowe układy mnożące. Przykładowy scalony układ mnożący AD633 [3] posiada

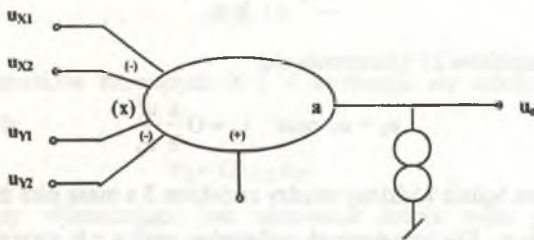
blokową strukturę katalogową (rys.10), której odpowiada relacja wiążąca sygnały zaciskowe, w postaci:

$$u_o = a [(u_{x1} - u_{x2})(u_{y1} - u_{y2})] + u_z \quad (22)$$



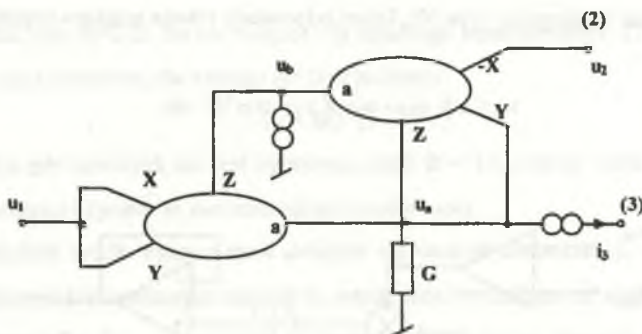
Rys. 10
Fig. 10

W celu ułatwienia teoretycznego opisu obwodów zawierających przedstawiony układ mnożący wprowadza się jego wyidealizowany model złożony z elementów osobliwych, a spełniający relację (22) oraz dodatkowo założenie, że prądy wszystkich zacisków wejściowych są równe zeru. Model ten przedstawiony jest na rys.11.



Rys. 11
Fig. 11

Zawiera on elementy osobliwe stosowane do modelowania elektronicznych układów analogowych [4]. Są to nullator wielozaciskowy oraz norator dwuzaciskowy. Bazując na tym modelu można zaproponować układ pokazany na rys.12, w którym pewne zaciski wejściowe X i Y nullatorów są połączone z masą, zatem napięcia na nich są równe zeru.



Rys. 12
Fig. 12

W obwodzie tym na podstawie relacji (22) otrzymuje się:

$$u_a = au_1^2 + u_b, \quad (23)$$

$$u_b = -bu_2 u_a + u_a. \quad (24)$$

Stąd:

$$u_a = \frac{a}{b} \frac{u_1^2}{u_2}, \quad (25)$$

co daje prąd wyjściowy o wartości:

$$i_3 = G \frac{a}{b} \frac{u_1^2}{u_2}. \quad (26)$$

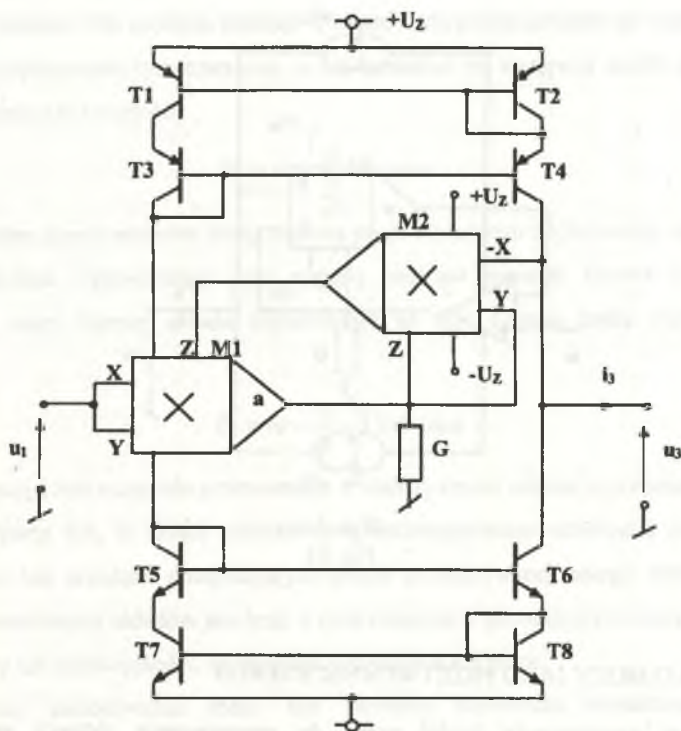
Po połączeniu zacisków 2 i 3 otrzymuje się:

$$u_2 = u_3 \quad \text{oraz} \quad i_3 = G \frac{a}{b} \frac{u_1^2}{u_3}. \quad (27)$$

Zatem układ ten będzie widziany między zaciskiem 3 a masą jako źródło mocy sterowane kwadratem napięcia u_1 . Dla jednakowych nullatorów, czyli $a = b$, otrzymuje się wartość mocy źródła:

$$P_3 = i_3 u_3 = Gu_1^2. \quad (28)$$

Korzystając z obwodu z rys.12 można zbudować praktyczny układ zawierający dwa układy mnożące typu AD633 oraz lustra prądowe złożone z tranzystorów bipolarnych odpowiedniego typu (T1 do T4 typu p-n-p oraz T5 do T8 typu n-p-n), co pokazano na rys.13.



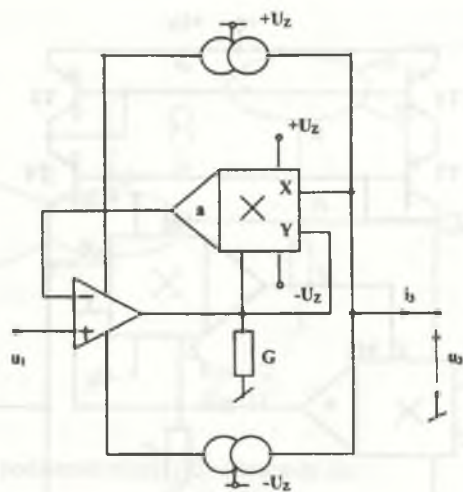
Rys. 13

Fig. 13

Po rozdzieleniu zacisków sterujących X i Y otrzymuje się źródło mocy sterowane iloczynem napięć, czyli:

$$P_3 = G u_{1X} u_{1Y} . \quad (29)$$

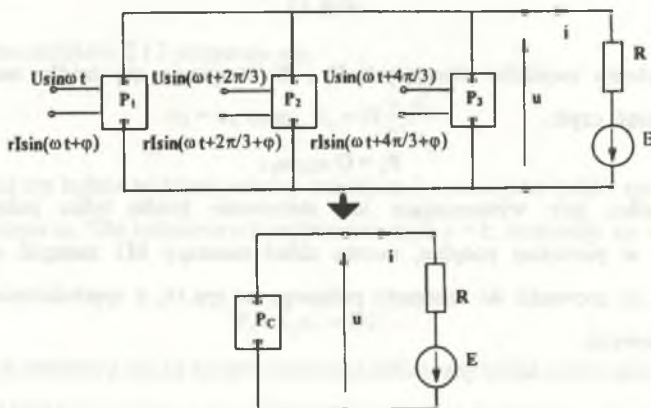
W przypadku, gdy wystarczające jest sterowanie źródła tylko jednym sygnałem napięciowym w pierwszej potędze, można układ mnożący M1 zastąpić wzmacniaczem operacyjnym, co prowadzi do schematu podanego na rys.14, z symbolicznie oznaczonymi lustrami prądowymi.



Rys. 14
Fig. 14

5. ŹRÓDŁO MOCY JAKO PRZETWORNIK ENERGII

Przykładem zastosowania źródeł mocy do przetwarzania różnych postaci mocy występujących w układach trójfazowych prądu zmiennego [5] jest układ z rys.15.



Rys. 15
Fig. 15

Jeżeli w układzie tym napięcia sterując źródłami będą proporcjonalne do napięć i prądów w układzie trójfazowym symetrycznym, to równoważne im zastępcze źródło mocy ma na podstawie wzoru (15) wartość:

$$P_C = i_u = \frac{ra}{2} UI \cos \varphi . \quad (30)$$

Jest on zatem przetwornikiem mocy czynnej prądu zmiennego trójfazowego na moc prądu stałego. Podobnie wprowadzając jako sygnały sterujące napięcia fazowe otrzymuje się przetwornik mocy biernej układu trójfazowego na moc czynną prądu stałego zgodnie z relacją:

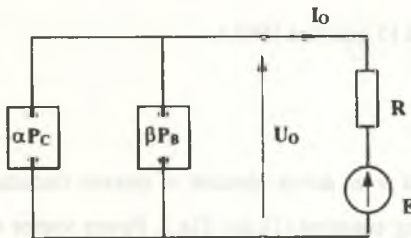
$$P_B = i_u = \frac{ra}{2} \sqrt{3} U_r I \sin \varphi . \quad (31)$$

Moce te mogą być następnie przetwarzane w dalszej części układu, reprezentowanej przez dwójnik aktywny RE, w celach pomiarowych, automatycznego sterowania odbiorników i zabezpieczeń lub urządzeń polepszających jakość przekazywanej energii elektrycznej [5]. Zaletą proponowanych układów jest brak w nich elementów gromadzących energię, takich jak kondensatory lub indukcyjności, co znacznie przyspiesza ich pracę.

Przykładem zastosowania może być potrzeba sterowania wzbudzeniem silnika synchronicznego sygnałem proporcjonalnym do kombinacji liniowej wartości mocy czynnej i biernej według relacji:

$$P_O = \alpha P_C + \beta P_B = I_O U_O . \quad (32)$$

Można to zadanie wykonać za pomocą podanych układów połączonych w sposób pokazany na rys.16, przy czym wielkości współczynników α i β kształtuje się przez odpowiedni dobór wartości konduktancji G w modelach źródeł z rys.13.



Rys. 16

Fig. 16

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione rozważania dotyczące pojęcia źródeł mocy są teoretycznymi propozycjami uzasadniającymi możliwość praktycznych zastosowań ich fizycznych modeli w układach pomiarowych i sterowania. Należy przy tym zbadać, jak dalece źródła mocy rzeczywiste różnią się własnościami od teoretycznych pod względem dokładności odwzorowania charakterystyki i stabilności pracy. Istotne znaczenie może też mieć zachowanie się charakterystyki źródła przy zbliżaniu się wartości prądu lub napięcia do wartości granicznych wynikających z parametrów technicznych zastosowanych układów elektronicznych.

LITERATURA

1. Singer S., Erickson R.W.: Power-source element and its properties. IEE Proc. CDS, No.3, 1994.
2. Singer S.: Realisation of loss-free resistive elements. IEEE Trans. CAS, No.1, 1990.
3. Analog Devices, Special Linear Reference Manual, Analog multiplier AD633, 1992.
4. Topór-Kamiński, Holajn P.: Dual differential current conveyor as an element of active circuits. XVII KKTOiUE, Wrocław 1994.
5. Pasko M., Topór-Kamiński L.: Active filter for minimalization of currents effective value in polyphase systems with nonsinusoidal waves. Int. Conf. Electrical Drives and Power Electronics, Slovakia, 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Mikołajuk

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 czerwca 1995 r.

Abstract

Power source is defined as an active element of electric circuits. Its characteristics on $i-v$ plane satisfies the following equation (1) and Fig.1. Power source can be controlled by other variables e.g. current, voltage, power or their functions (2) and Fig.3. Controlled power source connected between two linear circuits (Fig.4) is a power converter, according to the relation (27). Power source as an element of electric source is shown in Fig.6 and described by the equations (10) and (11). Power source as a load of linear two-port is shown in Fig.8. Its input

power is described by the equation (16). Two power sources connected as in Fig.9 form a negative impedance inverter, described by the relation (21). In order to facilitate theoretical description of the circuits comprising analog multiplier (Fig.10 and Eq.22) the idealized model composed of singular elements (Fig.11) is introduced. Basing on that model, the circuit as in Fig.12, which contains the power source controlled by voltage square, can be suggested. Basing on the circuit in Fig.12, practical circuit comprising two multipliers AD 633 and current mirrors can be arranged, which is shown in Fig.13 and Fig.14. The circuit shown in Fig.15 is an example of application of power sources for conversion of various power forms occurring in three-phase circuits of alternating current. It can be useful for excitation of synchronous motor with the signal proportional to linear combination of active power values according to the relation (32). This can be performed by power sources connected as in Fig.16.