ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z.139 Nr kol.1247

**Bogusław GRZESIK**

# UJEMNA REZYSTANCJA: MODEL MIKROELEKTRONICZNY, ENERGOELEKTRONICZNY ORAZ ELEKTROMECHANICZNY

Streszczenie. Celem artykułu jest przedstawienie zagadnienia ujemnej rezystancji w rozszerzonym ujęciu. Ujemną rezystancję opisuje się jako układ mikroelektroniczny, układ energoelektroniczny oraz jako układ elektromechaniczny. W pierwszej części pracy nakreślono w skrócie genezę pojęcia ujemnej rezystancji i przebieg jego rozwoju. Druga część arykułu zawiera definicję ujemnej rezystancji. W pozostałych trzech częściach przedstawiono kolejno trzy modele ujemnej rezystacji: mikroelektroniczny, energoelektroniczny oraz elektromechaniczny. Model mikroelektroniczny jest zbudowany z wykorzystaniem wzmacniacza operacyjnego. Omówiono dwa warianty modelu energoelektronicznego: rezystancję sterowaną napięciowo oraz rezystancję sterowaną prądowo.

# NEGATIVE RESISTANCE: MICROELECTRONICS, POWER ELECTRONICS AND ELECTROMECHANICAL MODELS

Summary. New broad presentation of the idea of negative resistance is the aim of the paper. Negative resistance is described in three different ways: as microelectronic, power electronic and electromechanical systems. There are a genesis and a history of its development given in the first part of the work. The second part of the paper defines the idea of negative resistance. The next three parts describe three models of negative resistance: microelectronic, power electronic and electromechanical. Microelectronic models is based on operational amplifier. Two types of power electronic models are given. The first one is of voltage controlled whereas the second one is of current controlled one.

# ОТРИИЦАТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ: МИКРОЭЛЕКТРОННАЯ ЭНЕРГОЭЛЕКТРОННАЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Резюме. Целью данной статьи является новая широкая интерпретация идеи отрицательного сопротивлениея. Отрицательное сопротивление описывается тремя различными способами такими как микроэлектронная, энергоэлектронная и электромеханическая система. В первой части работы даны генезис и история развития отрицательного сопротивления. Вторая часть статьи формирует идею отрицательного сопротивления. Следующие три часы статьи описывают три модели отрицательного сопротивления: микроэлектронную, энергоэлектронную и электромеханическую, причем микроэлектронная модэль построена на операционном усилителе. Даны два типа силовой электронной модели. Первая управляется напряжением, вто время как вторая - силой тока.

## 1. WPROWADZENIE

Pojęcie "ujemna rezystancja" pojawiło się w początku XX wieku wraz z rozwojem teorii układów generujących drgania niegasnące. Pojęcie to wykorzystywane było do opisu gereratora, w którym pewna część charakterystyki napięciowo-prądowej łuku może być przedstawiona jako ujemna rezystancja dynamiczna.

Pojawienie się wielosiatkowych lamp elektronowych zapoczątkowało rozwój układów generacyjnych, których funkcjonowanie wyjaśniano za pomocą ujemnej rezystancji.

Dalszy wzrost zainteresowania ujemną rezystancją nastąpił w latach pięćdziesiątych wraz z rozwojem elektroniki ciała stałego i powstaniem takich przyrządów, jak dioda tunelowa, dioda Gunna oraz tyrystor; charakterystyki napięciowo-prądowe tych przyrządów zawierają odcinki o ujemnej rezystancji dynamicznej [1], [2].

Z pojęciem ujemnej rezystancji ściśle wiąże się pojęcie "konwertor ujemnej impedancji". Przyjęło się oznaczać go nazwą: NIC (od angielskiej nazwy: negative impedance converter). W elektronice konwertory te wykorzystywane mogą być do uzyskania ujemnych impedancji (w postaci dwubiegunników) i do tworzenia układów o określonych funkcjach przejścia (w postaci czwórnika), a w tym do realizacji filtrów aktywnych RC we wzmacniaczach.

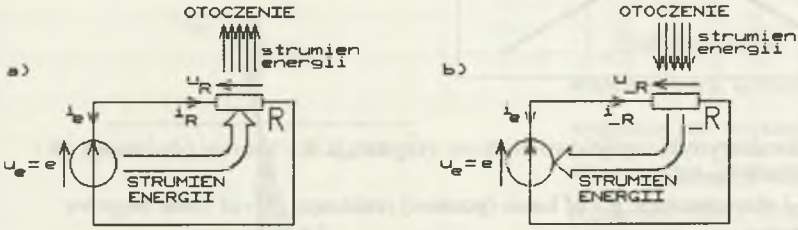
W energoelektronice pojęcie ujemnej rezystancji pojawiło się w związku z badaniami nad mocą w układach o przebiegach odkształconych; konkretnie, zadanie, w którym odbiornik liniowy RLC jest zasilany z idealnego źródła napięcia odkształconego, pełna kompensacja (składowej rozproszenia prądu) wymagają zastosowania dwójnika o ujemnej rezystancji [3]. Ponieważ tak postawiony problem kompensacji odnosi się do układów elektroenergetycznych praktycznych, to konieczna była analiza układu realizującego ujemną rezystancję pod względem sprawności [3]. Należało przy tym oczekiwać, że sprawność dwójników o ujemnej rezystancji, znanych w elektronice i wykorzystujących np. wzmacniacze operacyjne, jest niewysoka.

Poszukiwania realizacji ujemnej rezystancji o wysokiej sprawności wykazały, że najkorzystniejszą ze względów energetycznych jest realizacja energoelektroniczna [3, 4, 5].

## 2. IDEA UJEMNEJ REZYSTANCJI

W pierwszej próbie znalezienia odpowiedzi na pytanie "co to jest ujemna rezystancja?" najwygodniej jest wykorzystać opis dwójnika rezystancyjnego i posługując się rysunkiem 1.

W obwodzie z rys. 1.a energia przekazywana jest ze źródła e do rezystancji R i stamtąd w postaci ciepła przechodzi do otoczenia. Rys. 1b przedstawia obwód z ujemną rezystancją _R. Energia przekazywana jest w tym przypadku z otoczenia poprzez ujemną rezystancję do źródła e. Dalsze wyjaśnienia można prowadzić w kategorii teorii obwodów i pomocny jest tu rys.2. Naniesione są na nim przebiegi czasowe odpowiednich napięć, prądów i mocy obwodów

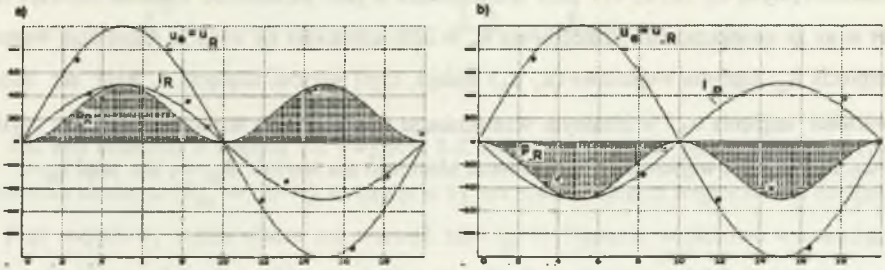



Rys.1. Przepływ energii pomiędzy źródłem napięcia e oraz: a) rezystancją R, b) ujemną rezystancją _R

Fig. 1. Energy flow between voltage source e and a) resistance R, b) negative resistance _R

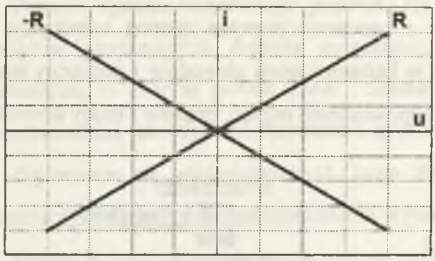
z rys.1. Rys.2.a dotyczy obwodu z rys.1.a, tj. obwodu z (dodatnią) rezystancją. Druga część, rys.2.b, dotyczy obwodu z ujemną rezystancją. Gdy do źródła e przyłączona jest rezystancja, to moce rezystancji (chwilowa i średnia) mają wartość dodatnią. Źródło e jest wydajnikiem, a rezystancja R odbiornikiem. Gdy elementem przyłączonym do źródła e jest ujemna rezystancja _R, to przeciwnie, moce te mają wartości ujemne. W tym przypadku źródło e jest odbiornikiem, a ujemna rezystancja _R wydajnikiem.

Ujemna rezystancja, podobnie jak rezystancja dodatnia, może być liniowa lub nieliniowa. Wyróżnia się rezystancję sterowaną napięciem i rezystancję sterowaną prądem. Na rys.3 przedstawiono tylko charakterystyki rezystancji liniowych dodatniej i ujemnej. W dalszej części omawia się tylko ujemną rezystancję liniową.




Rys.2. Przebiegi napięć, prądów i mocy w obwodach: a) z rys. 1.a, b) z rys.1.b

Fig.2. Waveforms of voltages, currents and power in circuits: a) in Fig. 1.a, b) in Fig. 1.b.

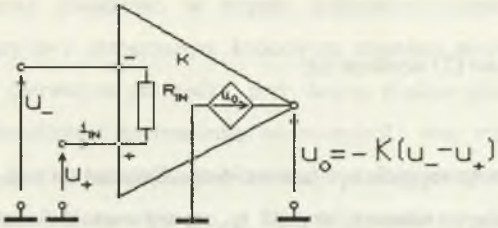



Rys. 3. Charakterystyki napięciowo-prądowe rezystancji: R - liniowej (dodatniej), _R - liniowej ujemnej

Fig. 3. V-I characteristics: R - of linear (positive) resistance, _R - of linear negative resistance

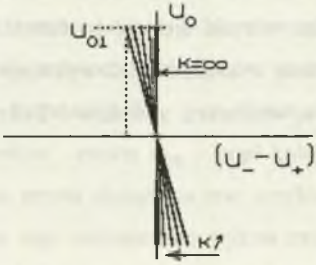
## 3. REALIZACJA UJEMNEJ REZYSTANCJI ZA POMOCĄ WMACNIACZA OPERACYJNEGO

Model mikroektroniczny ujemnej rezystancji bazuje na wzmacniaczu operacyjnym. Schemat wzmacniacza zamieszczono na rys.4. Wzmaczniacz operacyjny jest układem złożonym ze źródła napięcia $u_O$ sterowanego napięciem rezystancji wejściowej $R_{IN}$. Źródło to jest włączone pomiędzy masę i wyjście wzmaczniacza. Rezystancja wejściowa przyłączona jest pomiędzy zaciski wejściowe wzmaczniacza "-", "+". Jeżeli do wejścia wzmaczniacza przyłączone są napięcia $u_-$ oraz $u_+$, to napięcie na jego wyjściu ma wartość $u_O = -K(u_- - u_+)$. Prąd wejściowy wzmacniacza jest określony zależnością $i_{IN}=-(u_- - u_+)/R_{IN}$. Na rys. 4 pokazano charakterystykę $u_O=K((u_- - u_+)$ przy wzmocnieniu K jako parametrze. Rysunek ilustruje fakt, że wraz ze zwiększaniem wzmocnienia K, w celu uzyskania na wyjściu określonej wartości napięcia $u_O$, napięcie wejściowe $(u_- - u_+)$ maleje, czyli wartość napięcia $u_-$ staje się bliższa wartości napięcia $u_+$ W idealnym wzmacniaczu współczynnik wzmocnienia $K=\infty$, czyli $u_- = u_+$. Rezystancja wejściowa wzmaczniacza idealnego ma wartość $R_{IN}=\infty$, tzn. prąd $i_{IN}=0$.

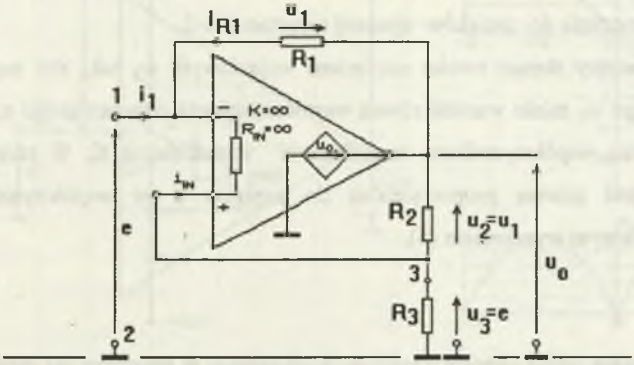



Rys.4.Schemat wzmacniacza operacyjnego

Fig.4.Schematic diagram of operational amplifier




Funkcjonowanie dwójnika o właściwościach ujemnej rezystancji wygodnie jest wyjaśnić posługując się pojęciem konwertera ujemnej rezystancji (NIC). Schemat takiego konwertora pokazano na rys. 5.




Rys.5. Schemat układu realizującego ujemną rezystancję przy wykorzystaniu wzmacniacza operacyjnego

Fig.5. Negative resistance realization by means of operational amplifier

Jest nim czwórnik o wejściu 1-2 i wyjściu 3-2. Jeżeli wzmacniacz operacyjny jest wzmacniaczem idealnym ($R_{IN}=\infty$, $K=\infty$), to napięcie $u_3$ jest równe napięciu wejściowemu dwójnika e. Prąd wejściowy wzmacniacza ma wartość zero $i_{IN}=0$. Napięcie wyjściowe wzmacniacza jest określone zależnością (1), co wynika z podziału napięcia na dzielniku złożonym z oporników $R_2$, $R_3$.

$$R_3/(R_2+R_3)=e \Rightarrow u_o=((R_2+R_3)/R_3)e \quad (1)$$

Przekształcając zależność (1) do postaci (2) uzyskuje się:

$$u_0 = u_2 + e \quad (2)$$

Ponieważ $u_0$=e, to napięcie $u_2$ jest równe napięciu $u_1$ i jest ono proporcjonalne do napięcia e. Napięcia $u_1$ i $u_2$ mają wartość dodatnią, co oznacza, że prąd $i_{R1}$ ma też wartość dodatnią. Jeżeli prąd $i_{R1}$ ma wartość dodatnią, to prąd $i_1$ ma wartość ujemną, co dowodzi, że przy wszystkich rezystancjach liniowych dwójnik widziany z zacisków 1-2 wykazuje własności rezystancji ujemnej liniowej. Rezystancja wejściowa, widziana z zacisków 1-2 określana jest zależnością (3).

$$R_{WE} = e/i_1 = -(R_1/R_2)R_3 \quad (3)$$

Schemat z rys.5 i powyższe zależności pozwalają na pełną analizę zasad funkcjonowania układu jako ujemnej rezystancji oraz na analizę zależności energetycznych zachodzących w układzie.

Zasadniczym elementem układu z rys.5 jest wzmacniacz operacyjny. Spełnia on rolę zarówno regulatora prądu, jak i źródła napięciowego (sterowanego) $u_0$, które przekazuje energię elektryczną z otoczenia do zacisków ujemnej rezystancji 1-2.

Wzmacniacz operacyjny steruje swoim napięciem wyjściowym $u_0$ tak, aby napięcie wejścia nieodwracającego $u_+$ miało wartość równą wartości napięcia odwracającego $u_-$=e z dokładnością wyznaczoną współczynnikiem wzmocnienia wzmacniacza K. W rezultacie różnica napięć $u_0$-e jest zawsze proporcjonalna do napięcia e ze współczynnikiem proporcjonalnosci określonym wyrażeniem (4).

$$u_0/e=1+(R_2/R_1) \quad (4)$$

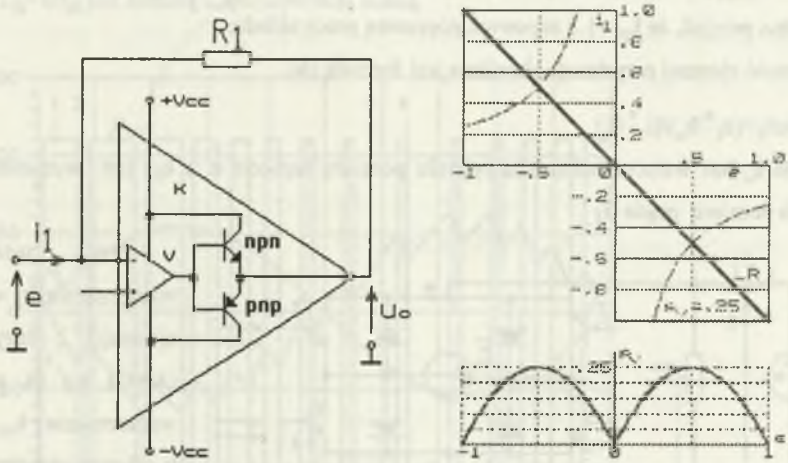
Tak wypracowana przez układ różnica napięć $u_0$-e zapewnia w oporniku R1 przepływ prądu $i_{R1}$, który jest równy prądowi $i_1$.

W układzie z rys. 5 występują straty energii. Analizę zależności energetycznych układu należy rozpocząć od ustalenia wejścia, przez które do układu {R1, R2, R3, V) wprowadzana jest energia. Są tu dwie możliwości. Gdy zachodzi pierwsza, to energia dostarczana jest przez zaciski sterowanego źródła napięcia 0-2. Straty energii zachodzą na opornikach R1, R2, R3. Gdy zachodzi możliwość druga, energia jest dostarczana do zacisków zasilania wzmacniacza $+V_{cc}$, $-V_{cc}$. W tym przypadku straty energii zachodzą na opornikach R1, R2,

R3 oraz dodatkowo w stopniu końcowym wzmacniacza operacyjnego. Wzmacniacz operacyjny z zaznaczonym końcowym stopniem mocy pokazano na rys. 6.

W pierwszym przypadku, przy danym prądzie ujemnej rezystancji $i_1$, moc strat można zminimalizować minimalizując rezystancje R1 oraz minimalizując prąd gałęzi $i_{R2}$.

W drugim przypadku w bilansie strat należy uwzględnić moc strat w stopniu wyjściowym wzmacniacza operacyjnego, w którym tranzystory pracują w obszarze aktywnym. Można to objaśnić za pomocą rys. 6, który sporządzono przy założeniu, że tranzystory są idealne, przy czym ich wzmocnienie prądowe normalne ma dostatecznie dużą wartość. Założono ponadto, że rezystancja R1 jest dostatecznie mała. Naniesione są tam charakterystyki: napięcie kolektor emiter $u_{ce}$ - prąd kolektora $i_c=i_1$ tranzystorów stopnia wyjściowego wzmacniacza, prosta obciążenia oraz przykładowe hiperbole strat mocy tranzystorów $p_v$. Na rys.5 oprócz tego umieszczono wykres zmian strat mocy jako funkcję napięcia e, które jest przy przyjętych założeniach w przybliżeniu równe napięciu wyjściowemu wzmacniacza $u_0$.




Rys.6. Analiza mocy strat w stopniu wyjściowym wzmacniacza operacyjnego pracującego w układzie z rys.5 realizującym ujemną rezystancję

Fig. 6. Analysis of energy loss of operational amplifier output stage in case it operates as negative resistance in Fig. 5

Analiza pracy stopnia końcowego wzmacniacza operacyjnego wykazuje, że nie istnieje możliwość zmniejszenia strat energii w nim zachodzących. Jedynymi wzmacniaczami, które cechują się wysoką sprawnością, są układy z modulacją szerokości impulsów, jakimi dysponuje energoelektronika. Układy takie omawia się w następnym punkcie wykładu.

## 4. MODEL ENERGOELEKTRONICZNY UJEMNEJ REZYSTANCJI

Jak wspomniano we wprowadzeniu, układ realizujący ujemną rezystancję przeznaczony do zastosowań kompensacyjnych w systemach elektroenergetycznych o odkształconych napięciach i prądach powinien mieć jak największą sprawność. Możliwość taką daje energoelektronika, przy czym układ ujemnej rezystancji może być zrealizowany na dwa sposoby: 1) przy sterowaniu napieciowym oraz 2) przy sterowaniu prądowym.

Rys.7 przedstawia schemat realizacji energoelektronicznej ujemnej rezystancji sterowanej napięciowo. Oznacza to, że sygnał napięciowy e pobierany z zacisków 1-2 stanowi wzorzec, podług którego układ regulacji tak steruje tranzystorami T1-T4, aby prąd $i_1$ z zadaną tolerancją był rówy $i_1=(-1/R_1)(u_0-e)$. Granice tolerancji zapewnia komparator z histerezą H.

Warunek ustalający wartość napięcia E wyraża sie zależnością (5).

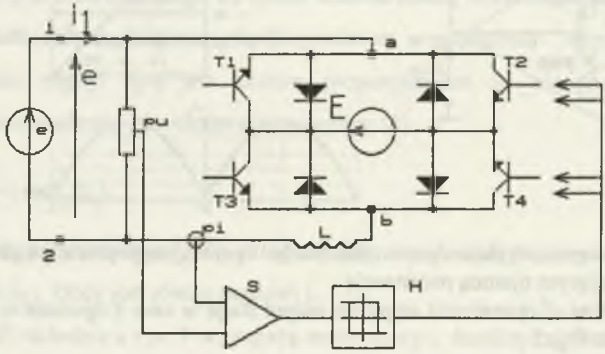
$$|E|/|E_{1max}| \geq k_{E1} \tag{5}$$

gdzie $E_{1max}$ jest maksymalną wartością napięcia e, która może wystąpić na zaciskach 1-2. Można przyjąć, że $k_{E1}=1.5$ zapewnia poprawną pracę układu.

Wartość ujemnej rezystancji określana jest formułą (6).

$$R=e/i_1=(e_1^*/k_e)/(i_1^*/k_i) \tag{6}$$

gdzie $k_e$ jest wzmocnieniem dla sygnału pomiaru napięcia e, a $k_i$ jest wzmocnieniem sygnału pomiaru prądu $i_1$.




Przy ustalonym wzmocnieniu $k_i$ wartość ujemnej rezystancji określa się za pomocą wzmocnienia $k_e$. Przy $k_e=0$ rezy-stancja ta jest równa zero. Zmieniając znak $k_e$ układ uzyskuje właściwości dodatniej rezystancji.

Rys. 7. Schemat realizacji energoelektronicznej ujemnej rezystancji sterowanej napieciowo; pu - element pomiarowy napięcia e, pi - element pomiarowy prądu $i_1$, S - sumator, H komparator z histerezą utrzymujący prąd $i_1$ w zadanych granicach

Fig. 7. Voltage controlled power electronic negative resistance; pu - probe for measurement of voltage e, pi - probe for measurement of current $i_1$, S - summator, H - hysteresis comparator keepping current $i_1$ inside needed area

Nastawa szerokości pętli histerezy wynika z dopuszczalnej tolerancji odchyłki prądu w stosunku do zadanej i wyrażona jest warunkiem (7).

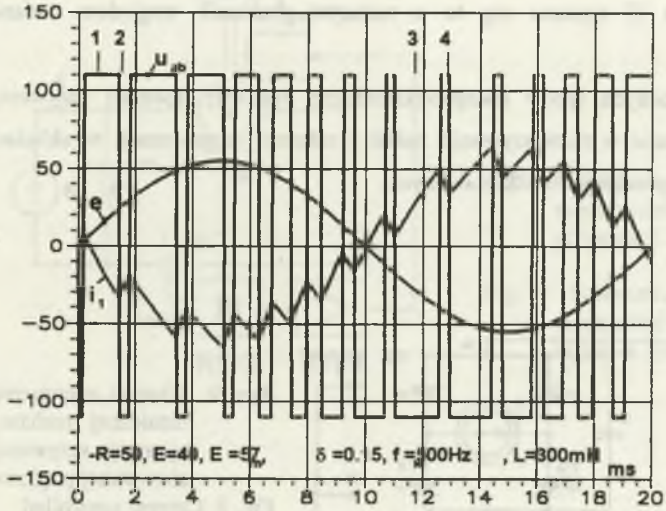
$$\delta I_{1max}/k_i = H/2 \qquad (7)$$

gdzie $\delta = \Delta I_1/I_{1max}$ jest względną odchyłką wartości prądu $i_1$ w stosunku do maksymalnej wartości prądu zadanego, H jest szerokością pętli histerezy elementu sterowania H. Przyjęcie współczynnika $\delta$ w granicach $\delta$=(kilka do kilkunastu %) jest wystarczające do rozważanego zastosowania, przy czym niższe wartości przyjmuje się przy wyższych średnich częstotliwościach przełączeń zaworów.

Ostani element układu, indukcyjność L, określana jest na podstawie przyjętej wartości napięcia E oraz założonej średniej częstotliwości przełączeń; podaje to zależność (8).

$$E/L = 4\delta I_{1max}/T_N \qquad (8)$$

gdzie $T_N = 1/f_N$ jest średnią częstotliwością nośną.




Rys. 8. Przebiegi napięć i prądów w energoelektronicznym układzie z rys.7, realizującym ujemną rezystancję sterowaną napięciowo; $E_m$=55 V, -R=70 Ω, E=110 V, $\delta$=0.15, L=200 mH, $f_N$=600 Hz

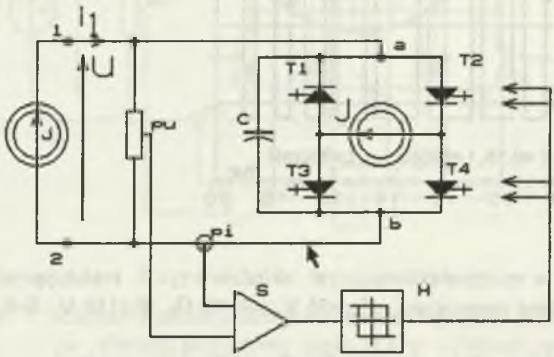
Fig. 8. Voltage and current waveforms of the circuit in Fig. 7, which realizes voltage controlled negative resistance; $E_m$=55V, -R=70 Ω, E=110 V, $\delta$=0.15, L=200 mH, $f_N$=600 Hz

Średnia częstotliwość nośna jest wynikiem kompromisu pomiędzy tolerancją uzyskiwanego prądu w stosunku do prądu zadanego i mocą strat powodowanych przełączaniem tranzystorów. Im wyższa jest ta częstotliwość, tym niższe wartości współczynnika $\delta$ są możliwe do osiągnięcia przy jednoczesnym wzroście mocy strat komutacyjnych. Maksymalna wartość częstotliwości nośnej $f_N$ jest zależna od rodzaju zastosowanych zaworów (tranzystory bipolarne, IGBT, tyrystory GTO, tranzystory MOSFET). Bezwzględnie częstotliwość tę można ustalić dla ujemnej rezystancji pracującej w sieci o częstoliwości podstawowej 50 Hz na poziomie kilkuset do kilku tysięcy Hz.

Schemat ujemnej rezystancji sterowanej prądowo jest zamieszczony na rys. 9. Układ jest dualny w stosunku do układu z rys.7. Źródło prądu j odpowiada źródłu napięcia e, a kondensator C dławikowi L. W układzie z rys. 9 muszą być zastosowane zawory mogące znajdować się w stanie blokowania oraz w stanie zaworowym. Odpowiada to dwukierunkowmu przewodzeniu przez każdą z par (T1-T4, T2-T3) tranzystorów układu z rys.7

W układzie sygnałem zadającym (wzorcem) jest sygnał odpowiadający prądowi źródła j. Napięcie kondensatora C zmienia się tu w zadanych granicach względem zadanej wartości tego napięcia.

Obydwa z wymienionych typów energoelektronicznej realizacji ujemnej rezystancji mogą znaleźć zastosowanie w rozwiązywaniu zadań z zakresu kompensacji w układach elektroenergetycznych z przebiegami odkształconymi.

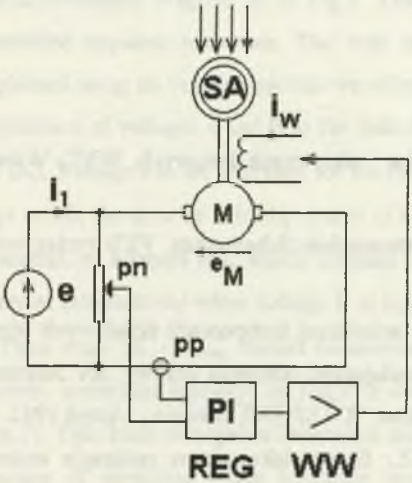



Rys. 9. Schemat energoelektronicznej realizacji ujemnej rezystancji sterowanej prądowo

Fig. 9. Current controlled power electronic negative resistance

## 5. MODEL ELEKTROMECHANICZNY UJEMNEJ REZYSTANCJI

Układ o właściwościach ujemnej rezystancji może być zrealizowany za pomocą elementów należących do klasy układów elektromechanicznych. Przykład takiego układu przedstawia rys.10. Układ funkcjonuje podobnie do układu z rysunku 4. Energia dostarczana jest do układu jako energia mechaniczna - maszyna obcowzbudna prądu stałego jest napędzana przez silnik np. indukcyjny klatkowy. Maszyna prądu stałego stanowi wzmacniacz mocy sterowany poprzez wzbudzenie. Układ sterowania złożony jest z regulatora PI oraz wzmacniacza WW. Sygnałem wzorcowym jest sygnał napięcia e. Sygnałem ujemnego sprzężenia zwrotnego jest sygnał pomiaru prądu $i_1$. Sprawność przekazywania energii jest tu nieco niższa od sprawności w układach energoelektronicznych. Omawiany układ elektromechaniczny może pracować jedynie w zakresie bardzo niskich częstotliwosci napięcia e.




Rys.10. Schemat realizacji elektromechanicznej ujemnej rezystancji

Fig.10. Schematic diagram of electromechanical realization of negative resistance

## 6. ZAKOŃCZENIE

Podsumowując należy zauważyć, że:

1. Sprawność układów realizujących ujemną rezystancję jest zależna od rodzaju konkretnego rozwiązania technicznego.

2. Wykazano, że niska sprawność układu ze wzmacniaczem operacyjnym jest wynikiem określonego typu jego końcowego stopnia mocy.
3. Najwyższą sprawność posiadają układy energoelektroniczne.
4. Uzyskanie układu o właściwościach ujemnej rezystancji jest możliwe, gdy jest zapewniony odpowiednio duży stosunek amplitud napięć/prądów źródła wewntęrznego ujemej rezystancji i sieci zasilającej (e/j) oraz ujemne sprzężenie zwrotne.
5. Omówione dwie odmiany realizowanej energoelektronicznie ujemnej rezystancji: sterowanej napięciowo oraz sterowanej prądowo ilustrują różnice, jakie między nimi istnieją; pierwsza ma cechy źródła prądu, druga źródła napięcia.
6. Ujemna rezystancja może znaleźć zastosowanie przy rozwiązywaniu zagadnień z zakresu kompensacji niepożądanych składowych napięcia i prądu w układach elektroenergetycznych.

## LITERATURA

1. Mitra S. K. : Analiza i synteza układów aktywnych liniowych. WNT, Warszawa 1974.
2. Benig F.: Negative Widerstande in elektronischen Schaltungen, VEB verlag technik, Berlin1971.
3. Pasko M., Grzesik B.: Model realizacji technicznej kompensacji składowych biernych prądu źródła napięcia odkształconego zasilającego odbiornik liniowy, XV Seminarium z podstaw elektrotechniki i teorii obwodów, XV SPETO, Gliwice - Ustroń 1992.
4. Pasko M., Grzesik B., Kaczmarczyk Z.: Energoelektroniczna realizacja techniczna dwójnika ujemnej rezystancji, XVI Seminarium z podstaw elektrotechniki i teorii obwodów, XVI SPETO, Gliwice - Ustroń 1993, t.1, s.225-232.
5. Grzesik B., Pasko M., Kaczmarczyk Z.: Active Filter witch Power Electrtonic Negative Resistance, Conference: Modern Control for Power Electronics and Electrical Drives, Łódź - Dobieszków 8-10.12.1993, t.1, s. 175-182.

Recenzent: Dr hab.inż. Maciej Tondos

Wpłynęło do Redakcji 28 marca 1994

**Abstract**

The aim of the paper is to give new broadened description of the idea of negative resistance. The genesis and the history of its development are given in the introduction - section 1. The idea of negative resistance is explained by means of energy flow diagrams in section 2. The case of positive resistance is depicted in Fig.1a, energy flows there from the source e to the resistance R. When negative resistance is connected to the source e (Fig.1b) then energy flows from negative resistance R to the source e. In the beginning of section 3 operational amplifier is described. It is a basis for the first model of negative resistance. The circuit that realises negative resistance termed microelectronics model is given in Fig.5. The main drawback of this circuit is its high energy loss which is caused by resistances $R_1$, $R_2$, $R_3$ (Fig.5) and output stage of the amplifier - Fig.6. Section 4, delivers two power electronics models of negative resistance of two different forms. The first is voltage controlled topology, which schematic diagram is in Fig.7. The second solution, depicted in Fig.9, is current controlled negative resistance. The way of operation of the topology given in Fig.7 is explained using its voltage/ current waveforms presented in Fig.8. Current $i_l$ is the result of application of voltages e and E to the inductor L (whereas voltage is connected via switches $T_*$, $D_*$). Voltage e is the reference for the current $i_l$. Instantaneous values of the current $i_l$ are kept within the error of $\pm H/2$ by means of hysteresis element H. Negative resistance value is described by formula (8), which contains coefficients $k_e$, $k_i$. Presented negative resistance operates satisfactorily when voltage E is higher then the absolute maximum value of voltage e. Their ratio $|E|/|E_{lmax}$ should be assumed to be higher or equal $k_{El} = 1.5$ assumed (7). Current controlled topology in Fig.9 is dual with respect to voltage controlled topology (Fig.7). This kind of negative resistance shapes the voltage u according to the reference $i_l$. Because of switching mode operation power electronics negative resistance has higher efficiency in comparison with the one based on operational amplifier. Electromechanical realization of negative resistance is described in section 5.In this case the energy is delivered from outside of the system via machines SA and M to source e. Since the system is continuous PI regulator can be applied, it controls the voltage $e_M$ of DC machine. Electromechanical negative resistance has high efficiency but considerably small frequency of the voltage source e is allowed.