

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **219747**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **395844**

(51) Int.Cl.  
**G05F 1/16 (2006.01)**

(22) Data zgłoszenia: **02.08.2011**

---

(54) **Sposób sterowania zasilaczem rezonansowym i zasilacz rezonansowy ze sterownikiem**

---

(43) Zgłoszenie ogłoszono:  
**04.02.2013 BUP 03/13**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:  
**31.07.2015 WUP 07/15**

(73) Uprawniony z patentu:

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE,  
Kraków, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**CEZARY WOREK, Kraków, PL**

(74) Pełnomocnik:

**rzecz. pat. Adam Pawłowski**

---

**PL 219747 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób sterowania zasilaczem rezonansowym z miękkim przełączaniem oraz zasilacz rezonansowy ze sterownikiem, przeznaczony do stabilizacji napięć, prądów lub mocy wyjściowej.

Większość rezonansowych zasilaczy nie jest w stanie zapewnić dobrej stabilizacji napięć, prądów lub mocy wyjściowej w pełnym zakresie zmian obciążenia, tzn. od stanu rozwarcia do stanu zwarcia. Ogólnie można przyjąć, że jeden lub nawet dwa z tych stanów są najbardziej niekorzystnymi stanami pracy. Aby temu zaradzić, modyfikuje się struktury rezonansowych obwodów mocy dodając na przykład układy zwrotu energii z rezonansowego obwodu do zasilania lub też modyfikuje się układy kontrolno-sterujące pracą kluczy prądowych.

W polskim opisie patentowym P-349476 został przedstawiony sposób kontroli napięcia i prądu wyjściowego zasilaczy posiadających obwody zwrotu (recyrkulacji) nadmiaru energii z kondensatora szeregowego obwodu rezonansowego do zacisków stałoprądowego źródła zasilania falownika, który posiada ogranicznik napięcia wyjściowego włączony swoim wejściem równolegle do obciążenia przykładowo za pomocą transformatora pełniącego także rolę transformatora wyjściowego. Wyjście prostownikowe tego ogranicznika dobroti połączone jest z szynami stałoprądowego zasilania falownika. Ogranicznik napięcia oraz obwód zwrotu energii wzajemnie uzupełniają swoje działanie w taki sposób, że obwód zwrotu ogranicza wartość prądu płynącego w obwodzie rezonansowym i w rezultacie nadmiar zgromadzonej energii trafia z powrotem do źródła zasilania zarówno ze strony ogranicznika napięcia jak i ze strony obwodów zwrotu energii. Dzięki temu, że zasilacz ciągle pracuje z recyrkulacją energii do źródła zasilania, przebieg prądu w obwodzie rezonansowym zachowuje quasi-sinusoidalny charakter nawet przy braku zewnętrznego obciążenia, a napięcie wyjściowe zmienne lub stałe jest ograniczone do poziomu zadanego parametrami ogranicznika napięcia. W innym przykładzie wykonania w celu wymuszenia quasi-sinusoidalnych przebiegów prądów w obwodzie rezonansowym na stałoprądowym wyjściu zasilacza dołączony został kondensator, który jest ładowany grupą impulsów wyprostowanej sinusoidy tak długo aż napięcie tego kondensatora osiągnie poziom wyłączenia ustalony dzielnikiem napięcia wyjściowego i napięciem odniesienia doprowadzonym do drugiego wejścia komparatora z zachowaniem warunku, że długość najkrótszej grupy impulsów wynosi trzy półokresy drgań własnych obwodu rezonansowego, a włączenia i wyłączenia grup impulsów zachodzą w momentach gdy prądy kluczy zmierzają do zera. Natomiast w przerwie pomiędzy grupami impulsów obwód rezonansowy jest zwierany przez załączenie kluczy przyległych do jednego bieguna zasilania stałoprądowego.

Z amerykańskiego opisu patentowego nr US 2010/0020569 znany jest rezonansowy konwerter posiadający układ adaptacyjnej kontroli czasu martwego poprawiający efektywność energetyczną, redukujący zaburzenia EMI oraz zmniejszający narażenia prądowo-napięciowe w elementach mocy. Czas martwy pomiędzy impulsami dostosowywany jest do wielkości napięcia wejściowego i regulowany na podstawie prądu płynącego przez indukcyjny element obwodu rezonansowego. Czas martwy pomiędzy impulsami może być również pobierany z tablicy ze stałymi „look-up table” lub na bieżąco obliczany z wartości napięcia wejściowego i amplitudy prądu płynącego w obwodzie rezonansowym.

Z amerykańskiego opisu patentowego nr US20030231514 znany jest rezonansowy konwerter z rezonansem szeregowo-równoległym oraz sposób jego sterowania, dedykowane do aplikacji wysokonapięciowych (nawet powyżej 100 kV). W układzie sterowania wyróżniono dwa stany pracy – stan pracy kontrolujący parametry wyjściowe układu oraz stan startu. W rozwiązaniu tym początek włączenia kluczy prądowych jest zsynchronizowany z wartością prądu w równoległym obwodzie rezonansowym. W szczególności, początek pierwszego włączenia klucza prądowego jednego z kluczy prądowych odbywa się przy maksymalnej wartości prądu w równoległym obwodzie rezonansowym i przy takiej samej polaryzacji jak w szeregowym obwodzie rezonansowym.

Z amerykańskiego opisu patentowego nr US20090034298 znana jest metoda sterowania zasilaczy rezonansowych AC-DC charakteryzująca się niskimi stratami mocy przy małym obciążeniu oraz w stanie czuwania. Bazuje ona na odpowiedzi częstotliwościowej układu i warunków obciążenia obwodu rezonansowego zasilacza i reguluje częstotliwość przełączania jak i czas trwania impulsu sterującego w taki sposób aby otrzymać stabilne napięcie wyjściowe. Metoda ta poprawia również swoje osiągi poprzez wykorzystanie techniki ZVS (Zero Voltage Switching) oraz wyjściowe prostowniki synchroniczne. Kontroler zasilacza rezonansowego wykorzystuje technikę hybrydową, polegającą na modulacji częstotliwości impulsów i jednocześnie wykorzystuje modulację szerokości impulsu (ang.

*frequency modulation hybrid pulse with modulation*, FMHYPWM). Pozwala to również wykorzystać układ sterujący do poprawy współczynnika mocy oraz do sterowania synchronicznym prostownikiem wyjściowym.

Ponadto, polskie zgłoszenie patentowe P-389886 przedstawia sposób sterowania mostka H w przekształtniku rezonansowym, który polega na naprzemiennym włączaniu kluczy mostka tak, że między włączeniem pary kluczy pierwszego i trzeciego lub drugiego i czwartego włącza się naprzemiennie pary kluczy górnych: pierwszy i czwarty lub dolnych: drugi i trzeci.

Wszystkie przedstawione powyżej metody sterowania są użyteczne, jednak nie w pełni wykorzystują możliwości, jakie daje sterowanie wykorzystujące drgania własne obwodu rezonansowego.

Celem wynalazku jest opracowanie sposobu sterowania zasilacza rezonansowego z miękkim przełączaniem, który zapewni dobrą stabilizację napięć, prądów lub mocy wyjściowej w pełnym zakresie zmian obciążenia, tzn. od stanu rozwarcia do stanu zwarcia.

Przedmiotem wynalazku jest sposób sterowania zasilaczem rezonansowym, zawierającym zespół łączników prądowych, pomiędzy którymi umieszczony jest obwód rezonansowy z obciążeniem wyjściowym, oraz sterownik do stabilizacji napięć lub prądów wyjściowych, poprzez sterowanie częstotliwością kluczkowania zespołu łączników prądowych w odpowiedzi na wskazania wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego, który charakteryzuje się pewnym czasem odpowiedzi ( $\tau_1$ ) na zmiany wartości napięcia lub prądu wyjściowego, charakteryzujący się tym, że za pomocą szybkiego układu monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii, charakteryzującego się czasem odpowiedzi ( $\tau_2$ ) na zmiany prądu (*logr*) mniejszym od czasu odpowiedzi ( $\tau_1$ ) wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego, zmienia się za pośrednictwem sterownika częstotliwość kluczkowania zespołu łączników prądowych w celu zmniejszenia mocy dostarczanej do obwodu rezonansowego po przekroczeniu przez natężenie prądu (*logr*) wartości progowej.

Korzystnie, za pomocą szybkiego układu monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii wywołuje się za pośrednictwem sterownika zwiększenie częstotliwości kluczkowania zespołu łączników prądowych.

Korzystnie, za pomocą szybkiego układu monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii wywołuje się za pośrednictwem sterownika wyłączenie kluczkowania zespołu łączników prądowych.

Korzystnie, za pomocą sterownika: przy dużych obciążeniach wyjściowych, powyżej wartości progowej, stabilizuje się napięcia lub prądy wyjściowe poprzez zmianę częstotliwości kluczkowania zespołu łączników prądowych z wykorzystaniem techniki miękkiego przełączania, tak aby włączanie łączników prądowych następowało dla ujemnego lub zerowego prądu łączników monitorowanego przez układ monitorowania prądu w obwodzie rezonansowym, zachowując w każdym okresie drgań obwodu rezonansowego wypełnienia dla każdego z kluczy zbliżone do 50%, i pracując z czasem martwym pomiędzy przełączeniami dobranym tak, aby w tym czasie martwym potencjał na łącznikach prądowych zdążył osiągnąć wartość bliską potencjałowi szyn zasilających, natomiast przy małych obciążeniach wyjściowych, poniżej wartości progowej mocy wyjściowej, stabilizuje się napięcia lub prądy wyjściowe poprzez sekwencyjne wykradanie pełnych okresów drgań własnych obwodu rezonansowego poprzez zwieranie części łączników prądowych i włączanie pozostałych łączników prądowych i włączanie ich ponownie w fazie, w której przepływa przez łączniki ujemny lub zerowy prąd.

Korzystnie, charakterystyka napięcia, prądu lub mocy wyjściowej od częstotliwości przełączania łączników prądowych jest niejednoznaczna i składa się z dwóch obszarów, z których pierwszy od braku obciążenia do maksymalnego obciążenia charakteryzuje się zmniejszaniem częstotliwości pracy łączników prądowych, zaś drugi od maksymalnego obciążenia do zwarcia charakteryzuje się zwiększaniem częstotliwości pracy łączników prądowych.

Przedmiotem wynalazku jest również zasilacz rezonansowy, zawierający: zespół łączników prądowych, pomiędzy którymi umieszczony jest obwód rezonansowy z obciążeniem wyjściowym, oraz sterownik do stabilizacji napięć lub prądów wyjściowych, poprzez sterowanie częstotliwością kluczkowania zespołu łączników prądowych w odpowiedzi na wskazania wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego, który charakteryzuje się pewnym czasem odpowiedzi ( $\tau_1$ ) na zmiany wartości napięcia lub prądu wyjściowego, charakteryzujący się tym, że zawiera ponadto szybki układ monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii, charakteryzujący się czasem odpowiedzi ( $\tau_2$ ) na zmiany prądu (*logr*) mniejszym od czasu odpowiedzi ( $\tau_1$ ) wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego, przystosowany do zmiany za pośrednictwem sterownika często-

tliwości kluczenia zespołu łączników prądowych w celu zmniejszenia mocy dostarczanej do obwodu rezonansowego po przekroczeniu przez natężenie prądu (*logr*) wartości progowej.

Korzystnie, szybki układ monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii, jest przystosowany do wywoływania za pośrednictwem sterownika zwiększenia częstotliwości kluczenia zespołu łączników prądowych.

Korzystnie, szybki układ monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii, jest przystosowany do wywoływania za pośrednictwem sterownika wyłączenia kluczenia zespołu łączników prądowych.

Korzystnie, sterownik jest przystosowany do pracy w dwóch trybach: – w pierwszym trybie, przy dużych obciążeniach wyjściowych, powyżej wartości progowej, jest przystosowany do stabilizowania napięć lub prądów wyjściowych poprzez zmianę częstotliwości kluczenia zespołu łączników prądowych z wykorzystaniem techniki miękkiego przełączania, tak aby włączanie łączników prądowych następowało dla ujemnego lub zerowego prądu łączników monitorowanego przez układ monitorowania prądu w obwodzie rezonansowym, zachowując w każdym okresie drgań obwodu rezonansowego wypełnienia dla każdego z kluczy zbliżone do 50%, i przystosowany do pracy z czasem martwym pomiędzy przełączeniami dobranym tak, aby w tym czasie martwym potencjał na łącznikach prądowych zdążył osiągnąć wartość bliską potencjałowi szyn zasilających, oraz w drugim trybie, przy małych obciążeniach wyjściowych, poniżej wartości progowej, jest przystosowany do stabilizowania napięć lub prądów wyjściowych poprzez sekwencyjne wykradanie pełnych okresów drgań własnych obwodu rezonansowego poprzez zwieranie części łączników prądowych i włączanie pozostałych łączników prądowych i włączanie ich ponownie w fazie, w której przepływa przez łączniki ujemny lub zerowy prąd.

Korzystnie, charakterystyka napięcia, prądu lub mocy wyjściowej od częstotliwości przełączania łączników prądowych jest niejednoznaczna i składa się z dwóch obszarów, z których pierwszy od braku obciążenia do maksymalnego obciążenia charakteryzuje się zmniejszaniem częstotliwości pracy łączników prądowych, zaś drugi od maksymalnego obciążenia do zwarcia charakteryzuje się zwiększaniem częstotliwości pracy łączników prądowych.

Przedmiot wynalazku został przedstawiony w przykładach wykonania na rysunku, na którym:

Fig. 1 przedstawia jeden przykład wykonania zasilacza rezonansowego ze sterownikiem, jako półmostkowej przetwornicy rezonansowej z układem ogranicznika dobroci opartej na dławiku wielouzwojeniowym DL1 będącym jednocześnie indukcyjnym elementem rezonansowego obwodu mocy oraz do którego przyłączane jest obciążenie.

Fig. 2 przedstawia inny przykład wykonania zasilacza rezonansowego ze sterownikiem, jako półmostkowej przetwornicy rezonansowej opartej na dławiku wielouzwojeniowym DL2 będącym jednocześnie indukcyjnym elementem rezonansowego obwodu mocy.

Fig. 3 przedstawia kolejny przykład wykonania zasilacza rezonansowego ze sterownikiem, jako pełnomostkowej przetwornicy rezonansowej opartej na dławiku wielouzwojeniowym DL2 będącym jednocześnie indukcyjnym elementem rezonansowego obwodu mocy.

Fig. 4 przedstawia przebiegi czasowe prądów i napięć w zasilaczu dla dużych obciążeń wyjściowych.

Fig. 5 przedstawia przebiegi czasowe prądów i napięć w zasilaczu dla małych obciążeń wyjściowych,

Fig. 6 przedstawia charakterystykę mocy wyjściowej od częstotliwości przełączania łączników prądowych,

Fig. 7 przedstawia wykres prądu i napięcia wyjściowego od częstotliwości przełączania łączników prądowych.

Fig. 8 przedstawia wykres czasu martwego od mocy wyjściowej.

Fig. 9 przedstawia wykres czasu martwego od częstotliwości przełączania łączników prądowych.

Fig. 1 przedstawia przykład wykonania zasilacza rezonansowego ze sterownikiem jako półmostkowej przetwornicy rezonansowej z układem ogranicznika dobroci opartym na dławiku wielouzwojeniowym DL1, w którego obwodzie magnetycznym znajduje się szczelina powietrzna. Zasilacz zawiera zespół łączników prądowych K1, K2 połączonych w półmostek. W przekątnej półmostka przyłączony jest szeregowo-równoległy obwód rezonansowy złożony z induktora L2, pojemności C1, równoległego połączenia pojemności C2A i C2B tworzący pojemność wypadkową C2 oraz induktora L1, który jest częścią dławika wielouzwojeniowego DL1 separującego galwanicznie uzwojenia ogranicznika dobroci L3, oraz uzwojenia obwodu obciążenia L4 za pośrednictwem którego, poprzez prostownik

diodowy PD1, do zasilacza przyłączane jest obciążenie. Induktor L2 wraz z wypadkową pojemnością C2 utworzoną z równoległego połączenia pojemności C2A i C2B tworzą szeregowy obwód rezonansowy, zaś pojemność C1 i induktor L1, który jest częścią dławika wielouzwojeniowego DL1 tworzy równoległy obwód rezonansowy. Układ zwrotu nadmiaru energii z obwodu rezonansowego UZNE1 utworzony jest poprzez silne sprzężenie magnetyczne pomiędzy uzwojeniami induktorów L1 i L3 w dławiku wielouzwojeniowym oraz induktor L5 i prostownik PD2 który to układ ogranicza dobroć obwodu rezonansowego, dzięki czemu nadmiar energii w obwodzie rezonansowym zwracany jest do źródła zasilania Uzasilania. Korzystnie jest do każdego z łączników prądowych K1, K2 dołączyć równoległe elementy reaktancyjne C3, C4 tak aby układ pracował w klasie DE z tak zwanym miękkim przełączaniem kluczy K1 i K2. Wartości elementów są dobrane w taki sposób, że utrzymana jest ciągłości prądu w obwodzie rezonansowym niezależnie od obciążenia, a tym samym znacznie zwiększono dynamikę odpowiedzi zasilacza na zmiany obciążenia. Przykładowo, parametry układu przedstawionego na Fig. 1 są następujące: moc wyjściowa = 3kW, napięcie zasilania Uzasilania = 410V, Uwyjściowe = 50VDC, C1 = 90 nF, C2A = C2B = 60 nF, C2 = C2A + C2B = 120 nF, C3 = C4 = 4.7 nF, L2 = 30 uH, L1 = 100 uH, L3 = 55 uH, L4 = 4 uH, L5 = 1.8 uH, przy współczynniku sprzężenia pomiędzy L1 i L3 równym  $k = 0.99$ , oraz współczynniku sprzężenia pomiędzy L1 i L4 równym  $k = 0.95$ .

Sterownik (S) jest przystosowany do pracy w dwóch zakresach obciążenia, które jest monitorowane przez układ monitorowania napięcia i/lub prądu wyjściowego UMW lub inny, dedykowany układ pomiaru obciążenia wyjściowego.

W pierwszym trybie pracy, zwanym obszarem dużych mocy wyjściowych, przy dużych obciążeniach wyjściowych, to znaczy powyżej wartości progowej, stabilizuje się napięcia lub prądy wyjściowe poprzez zmianę częstotliwości kluczowania zespołu łączników prądowych K1, K2 z wykorzystaniem techniki miękkiego przełączania. Włączanie łączników prądowych K1, K2 następuje dla ujemnego lub zerowego prądu łącznika K1, K2, monitorowanego przez układ monitorowania prądu w obwodzie rezonansowym (UMP2). W każdym okresie drgań obwodu rezonansowego zachowuje się wypełnienie dla każdego z łączników K1, K2 zbliżone do 50%, tak aby czas martwy i czas włączenia jednego z kluczy półmostka lub dwóch kluczy prądowych na przekątnej pełnego mostka był równy czasowi martwemu i czasowi włączenia drugiego z kluczy pół-mostka lub dwóch pozostałych kluczy prądowych na przekątnej pełnego mostka. Czas martwy pomiędzy przełączeniami dobiera się tak, aby w tym czasie martwym potencjał na łącznikach prądowych K1, K2 zdążył osiągnąć wartość bliską potencjałowi szyn zasilających. Ze względu na to, że charakterystyka napięcia, prądu lub mocy wyjściowej od częstotliwości, jest niejednoznaczna i składa się z dwóch obszarów z których pierwszy od braku obciążenia do maksymalnego obciążenia charakteryzuje się zmniejszaniem częstotliwości pracy łączników prądowych, zaś drugi od maksymalnego obciążenia do zwarcia charakteryzuje się zwiększaniem częstotliwości pracy kluczy prądowych kierunek zmian częstotliwości kluczowania jest wybierany na podstawie pomiaru mocy wyjściowej lub przy stabilizacji napięcia wyjściowego można to osiągnąć poprzez prosty układ logiczny który stabilizuje napięcie poprzez zmniejszanie częstotliwości gdy obciążenie rośnie i po przekroczeniu maksymalnego prądu obciążenia stabilizuje prąd wyjściowy tak, że gdy rezystancja obciążenia maleje częstotliwość kluczowania rośnie.

Możliwe jest takie dobranie stałego czasu martwego pomiędzy włączeniami kluczy K1 i K2 aby zawsze nastąpiło ono tak, aby potencjał na łącznikach prądowych (K1, K2) zdążył osiągnąć wartość bliską potencjałowi szyn zasilających. Jednak nie jest to optymalne rozwiązanie ze względu na dysponowaną moc dostarczaną do obciążenia. Dlatego opcjonalnie sterownik (S) jest przystosowany również do monitorowania napięcia na wyjściu półmostka Uk12 przez układ UMN1 i tak ustalania czasu martwego w zależności od napięcia Uk12 aby potencjał na łącznikach prądowych (K1, K2) zdążył osiągnąć wartość bliską potencjałowi szyn zasilających a jednocześnie był on możliwie krótki.

Zasilacz zawiera układ zwrotu nadmiaru energii z obwodu rezonansowego UZNE1 i układ monitorowania prądu UMP1 służący do ograniczania dobroci obwodu rezonansowego, połączony przez prostownik diodowy PD2 do napięcia zasilającego Uzasilania. Układ UZNE1 pozwala zabezpieczyć strukturę zasilacza rezonansowego przed niebezpiecznymi przepięciami i przetężeniami, gdyż za jego pomocą nadmiar energii znajdujący się w obwodzie rezonansowym w stanach nieustalonych jest zwracany do źródła zasilania. Układ monitorowania prądu UMP1 przystosowany jest do monitorowania natężenia prądu  $I_{logr}$  w układzie zwrotu nadmiaru energii z obwodu rezonansowego UZNE1 i do wywołania za pośrednictwem sterownika S zmiany częstotliwości kluczowania zespołu łączników prądowych K1, K2 w celu zmniejszenia mocy dostarczanej do obwodu rezonansowego po przekroczeniu

przez  $\log r$  wartości progowej natężenia prądu w układzie zwrotu nadmiaru energii z obwodu rezonansowego UZNE1.

Korzystnie jest aby układ monitorowania prądu UMP1 działał szybko i reagował nawet w przeciągu pół okresu sekwencji sterującej łącznikami prądowymi. Ogólnie rzecz biorąc, układ monitorowania prądu UMP1 powinien charakteryzować się czasem odpowiedzi ( $\tau_2$ ) na zmiany prądu ( $\log r$ ) mniejszym od czasu odpowiedzi ( $\tau_1$ ) wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego (UMW). Czas odpowiedzi ( $\tau_1$ ) wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego (UMW) jest uzależniony od parametrów filtra wyjściowego, za pośrednictwem którego układ UMW jest przyłączony do wyjścia, i wynosi przykładowo kilkaset Hz.

Zmiana częstotliwości kluczkowania zespołu łączników prądowych K1, K2 ma polegać na zmniejszeniu mocy dostarczanej do obciążenia np. poprzez zwiększenie częstotliwości kluczkowania łączników prądowych albo „wykradzenie” pewnej ilości okresów/drgań obwodu rezonansowego, to znaczy wyłączenie zespołu łączników prądowych, tak aby ograniczyć przepięcia i przetężenia występujące w obwodzie.

Fig. 2 przedstawia inny przykład wykonania zasilacza rezonansowego ze sterownikiem, jako półmostkowej przetwornicy rezonansowej. Względem układu przedstawionego na Fig. 1 główna różnica polega na podłączeniu układu zwrotu nadmiaru energii UZNE1 do innego elementu reaktancyjnego (L2) głównego obwodu rezonansowego i uproszczenie konstrukcji wielouzwojeniowego dławika DL1 do którego podłączone jest obciążenie.

Fig. 3 przedstawia kolejny przykład wykonania zasilacza rezonansowego ze sterownikiem, jako pełnomostkowej przetwornicy rezonansowej opartej na dławiku wielouzwojeniowym DL1 będącym jednocześnie indukcyjnym elementem rezonansowego obwodu mocy wraz z układem zwrotu nadmiaru energii z obwodu rezonansowego UZNE1 opartym o element indukcyjny DL2. Ten przykład wykonania jest oparty o szeregowy obwód rezonansowy przyłączony w przekątnej mostka, którego częścią jest dławik wielouzwojeniowy DL1, za pośrednictwem którego do zasilacza przyłączane jest obciążenie z tym że zastosowano dwie pary łączników prądowych K1, K2, K3, K4.

Dla specjalisty będzie czytelnym, że przedstawiony sposób może być stosowany również do zasilaczy rezonansowych o innych niż przedstawione powyżej strukturach, zawierających zespół łączników prądowych, pomiędzy którymi umieszczony jest obwód rezonansowy.

Fig. 4 przedstawia przebiegi czasowe prądów i napięć w przykładzie wykonania zasilacza z Fig. 1 dla nominalnego obciążenia na wyjściu. Na wykresie pierwszym od góry przedstawiono linią ciągłą napięcie sterujące bramką górnego tranzystora K1 a linią przerywaną napięcie sterujące bramką dolnego tranzystora K2. Na wykresie środkowym przedstawiono linią ciągłą prąd drenu górnego tranzystora K1 a linią przerywaną prąd drenu dolnego tranzystora K2. Na wykresie dolnym przedstawiono prąd płynący przez induktor L1.

W drugim trybie pracy, zwanym obszarem małych mocy wyjściowych, przy małych obciążeniach wyjściowych, to znaczy poniżej wartości progowej, napięcia lub prądy wyjściowe stabilizuje się poprzez sekwencyjne wykradanie pełnych okresów drgań własnych obwodu rezonansowego które następuje poprzez zwieranie części łączników prądowych, na przykład jednego z kluczy półmostka lub dwóch naprzeciwległych kluczy prądowych pełnego mostka, i włączanie pozostałych łączników prądowych, to znaczy drugiego klucza prądowego półmostka lub pozostałych kluczy prądowych pełnego mostka, i włączanie ich ponownie w fazie, w której przepływa przez łączniki ujemny lub zerowy prąd. Aby to osiągnąć w czasie wykradania pełnych okresów drgań własnych obwodu rezonansowego przez układ monitorowania prądu Ik12 (UMP2) mierzony jest prąd drgań własnych obwodu rezonansowego Ik12 dzięki czemu sterownik S może włączyć ponownie naprzemienne klucze K1 i K2 w odpowiedniej fazie gdy przepływa przez klucze ujemny lub zerowy prąd.

Fig. 5 przedstawia przebiegi czasowe prądów i napięć w zasilaczu dla małych obciążeń wyjściowych, przy obciążeniu równym 3OHM. Górny wykres przedstawia napięcie wyjściowe. Na wykresie drugim od góry przedstawiono linią ciągłą napięcie sterujące bramką górnego tranzystora K1 a linią przerywaną napięcie sterujące bramką dolnego tranzystora K2. Na wykresie trzecim od góry przedstawiono linią ciągłą prąd drenu górnego tranzystora K1 a linią przerywaną prąd drenu dolnego tranzystora K2. Na wykresie dolnym przedstawiono prąd płynący przez induktor L1. Sterowanie odbywa się poprzez sekwencyjne wykradania pełnych okresów drgań własnych obwodu rezonansowego w taki sposób, że w czasie wykradania okresów klucz K2 półmostka zwarty jest do masy zasilania zaś klucz K1 półmostka jest rozłączony. W takim przypadku obwód rezonansowy ma zamkniętą ścieżkę

dla przepływu prądu i dzięki dużej dobroci utrzymuje przez stosunkowo długi czas prąd krążący w swoich obwodach, na przykład w induktorze L2. Po spadku napięcia na kondensatorze/filtrze wyjściowym, falownik jest ponownie uruchamiany aby dostarczyć energię do obciążenia, jednak aby zminimalizować straty i zaburzenia EMI klucze prądowe włączane są w takiej fazie, aby włączenie nastąpiło z prądem łącznika mniejszym lub równym zero. Do czasu około 10 us obydwa łączniki pracują naprzemiennie. Gdy napięcie na filtrze wyjściowym przekroczy pewną ustaloną wartość następuje wykradanie pełnych okresów drgań własnych obwodu rezonansowego w taki sposób, że w czasie wykradania okresów klucz K2 półmostka zwarty jest do masy zasilania zaś klucz K1 półmostka jest rozłączony. Układ rezonansowy drga ze swoją własną częstotliwością rezonansową. Gdy napięcie na filtrze wyjściowym osiągnęło ustaloną minimalną wartość w punkcie bliskim 52 us następuje ponowne naprzemienne włączenie kluczy prądowych aby dostarczyć energii do obciążenia. Napięcie na filtrze wyjściowym rośnie znowu do ustalonej wartości maksymalnej po czym następuje ponowne wykradanie pełnych okresów drgań własnych obwodu rezonansowego w taki sposób, że w czasie wykradania okresów klucz K2 półmostka zwarty jest do masy zasilania zaś klucz K1 półmostka jest rozłączony.

W przypadku, gdy jako łączniki stosuje się tranzystory, to jako wspomniany powyżej prąd łącznika rozumie się jako prąd drenu/kolektora wraz z zintegrowaną z nimi diodą włączoną antyrównolegle.

Fig. 6 przedstawia charakterystykę mocy wyjściowej od częstotliwości przełączania łączników prądowych. Charakterystyka ta jest niejednoznaczna i składa się z dwóch obszarów z których pierwszy od braku obciążenia do maksymalnego obciążenia charakteryzuje się zmniejszaniem częstotliwości pracy łączników prądowych K1, K2, zaś drugi od maksymalnego obciążenia do zwarcia charakteryzuje się zwiększaniem częstotliwości pracy łączników prądowych K1, K2. Idealnie zaprojektowany rezonansowy układ przetwarzania energii powinien dostarczać do nominalnego obciążenia nominalną moc i poza tym punktem pracy moc na obciążeniu powinna być mniejsza. Występuje wtedy tzw. dopasowanie energetyczne i możliwe jest osiągnięcie maksymalnej sprawności układu przetwarzania energii. Dodatkowo można w ten sposób minimalizować przetężenia i przepięcia jakie występują w rezonansowym układzie przetwarzania energii.

Fig. 7 przedstawia wykres prądu (linia ciągła) i napięcia wyjściowego (linia przerywana) od częstotliwości przełączania łączników prądowych K1, K2.

Fig. 8 przedstawia wykres czasu martwego od mocy wyjściowej, natomiast Fig. 9 przedstawia wykres czasu martwego od częstotliwości przełączania łączników prądowych K1, K2. Ze względu na to że do łączników prądowych dołączono równolegle kondensatory tak aby układ pracował w klasie DE z tak zwanym miękkim przełączaniem kluczy, optymalny czas martwy jest zależny od impedancji obwodu rezonansowego, a ta z kolei zależy głównie od częstotliwości pracy łączników prądowych oraz wielkości obciążenia, dlatego też zmienia się on w dość szerokim zakresie. Z tego powodu aby osiągnąć jak najlepsze właściwości energetyczne korzystnie jest na bieżąco monitorować napięcie na wyjściu mostka lub półmostka i pracować z czasem martwym pomiędzy przełączeniami tak dobranym, aby w tym czasie martwym potencjał na łącznikach prądowych (K1, K2) zdążył osiągnąć wartość bliską potencjałowi szyn zasilających.

Przykładowo, jako wartość progową do określania granicy pomiędzy obszarem dużych mocy a obszarem małych mocy przyjmuje się 10% dopuszczalnego pełnego obciążenia zasilacza. Wówczas, stabilizacja napięcia lub/i prądu wyjściowego dla mocy w zakresie 10% – 100% pełnego obciążenia odbywa się poprzez zmiany częstotliwości kluczenia zespołu łączników prądowych (K1, K2) z wykorzystaniem techniki miękkiego przełączania i posiada tę zaletę, że ma prostą konstrukcję, łatwo osiągnąć jest stabilność oraz jest sprawna energetycznie. Natomiast stabilizacja obciążenia wyjściowego dla mocy w zakresie 0% – 10% pełnego obciążenia poprzez sekwencyjne wykradanie pełnych okresów drgań własnych ma tę zaletę, że w tym zakresie jest bardzo sprawna energetycznie oraz nie wymaga dużych zmian częstotliwości pracy przez co łatwiej osiąga się stabilność pętli sprzężenia zwrotnego.

## Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób sterowania zasilaczem rezonansowym, zawierającym:

- zespół łączników prądowych (K1, K2, K3, K4),
- pomiędzy którymi umieszczony jest obwód rezonansowy z obciążeniem wyjściowym,
- oraz sterownik (S) do stabilizacji napięć lub prądów wyjściowych, poprzez sterowanie częstotliwością kluczenia zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) w odpowiedzi na wskazania wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego (UMW), który charakteryzuje się pewnym czasem odpowiedzi ( $\tau_1$ ) na zmiany wartości napięcia lub prądu wyjściowego,

**znamienny tym, że**

- za pomocą szybkiego układu (UMP1) monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii UZNE1, charakteryzującego się czasem odpowiedzi ( $\tau_2$ ) na zmiany prądu (*logr*) mniejszym od czasu odpowiedzi ( $\tau_1$ ) wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego (UMW), zmienia się za pośrednictwem sterownika (S) częstotliwość kluczenia zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) w celu zmniejszenia mocy dostarczanej do obwodu rezonansowego po przekroczeniu przez natężenie prądu (*logr*) wartości progowej.

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że za pomocą szybkiego układu (UMP1) monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii UZNE1 wywołuje się za pośrednictwem sterownika (S) zwiększenie częstotliwości kluczenia zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4).

3. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że za pomocą szybkiego układu (UMP1) monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii UZNE1 wywołuje się za pośrednictwem sterownika (S) wyłączenie kluczenia zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4).

4. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że za pomocą sterownika (S):

- przy dużych obciążeniach wyjściowych, powyżej wartości progowej,
  - stabilizuje się napięcia lub prądy wyjściowe poprzez zmianę częstotliwości kluczenia zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) z wykorzystaniem techniki miękkiego przełączania,
  - tak aby włączanie łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) następowało dla ujemnego lub zerowego prądu łączników (K1, K2, K3, K4) monitorowanego przez układ monitorowania prądu w obwodzie rezonansowym (UMP2),
  - zachowując w każdym okresie drgań obwodu rezonansowego wypełnienia dla każdego z kluczy zbliżone do 50%,
  - i pracując z czasem martwym pomiędzy przełączeniami dobranym tak, aby w tym czasie martwym potencjał na łącznikach prądowych (K1, K2, K3, K4) dążył osiągnąć wartość bliską potencjałowi szyn zasilających,
- natomiast przy małych obciążeniach wyjściowych, poniżej wartości progowej,
  - stabilizuje się napięcia lub prądy wyjściowe poprzez sekwencyjne wykradanie pełnych okresów drgań własnych obwodu rezonansowego poprzez zwieranie części łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) i włączanie pozostałych łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) i włączanie ich ponownie w fazie, w której przepływa przez te łączniki ujemny lub zerowy prąd.

5. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że charakterystyka napięcia, prądu lub mocy wyjściowej od częstotliwości przełączania łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) jest niejednoznaczna i składa się z dwóch obszarów, z których pierwszy od braku obciążenia do maksymalnego obciążenia charakteryzuje się zmniejszaniem częstotliwości pracy łączników prądowych (K1, K2, K3, K4), zaś drugi od maksymalnego obciążenia do zwarcia charakteryzuje się zwiększaniem częstotliwości pracy łączników prądowych (K1, K2, K3, K4).

6. Zasilacz rezonansowy, zawierający:

- zespół łączników prądowych (K1, K2, K3, K4),
- pomiędzy którymi umieszczony jest obwód rezonansowy z obciążeniem wyjściowym,
- oraz sterownik (S) do stabilizacji napięć lub prądów wyjściowych, poprzez sterowanie częstotliwością kluczenia zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) w odpowiedzi na wskazania wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego (UMW), który



charakteryzuje się pewnym czasem odpowiedzi ( $\tau_1$ ) na zmiany wartości napięcia lub prądu wyjściowego,

**znamienny tym, że**

- zawiera ponadto szybki układ (UMP1) monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii UZNE1, charakteryzujący się czasem odpowiedzi ( $\tau_2$ ) na zmiany prądu (*logr*) mniejszym od czasu odpowiedzi ( $\tau_1$ ) wolnego układu monitorowania napięcia lub prądu wyjściowego (UMW), przystosowany do zmiany za pośrednictwem sterownika (S) częstotliwości kluczowania zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) w celu zmniejszenia mocy dostarczanej do obwodu rezonansowego po przekroczeniu przez natężenie prądu (*logr*) wartości progowej.

7. Zasilacz według zastrz. 1, **znamienny tym**, że szybki układ (UMP1) monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii UZNE1, jest przystosowany do wywoływania za pośrednictwem sterownika (S) zwiększenia częstotliwości kluczowania zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4).

8. Zasilacz według zastrz. 1, **znamienny tym**, że szybki układ (UMP1) monitorowania prądu (*logr*) w układzie zwrotu nadmiaru energii UZNE1, jest przystosowany do wywoływania za pośrednictwem sterownika (S) wyłączenia kluczowania zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4).

9. Zasilacz według zastrz. 1, **znamienny tym**, że sterownik (S) jest przystosowany do pracy w dwóch trybach:

- w pierwszym trybie, przy dużych obciążeniach wyjściowych, powyżej wartości progowej.
  - jest przystosowany do stabilizowania napięć lub prądów wyjściowych poprzez zmianę częstotliwości kluczowania zespołu łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) z wykorzystaniem techniki miękkiego przełączania,
  - tak aby włączanie łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) następowało dla ujemnego lub zerowego prądu łączników (K1, K2, K3, K4) monitorowanego, przez układ monitorowania prądu w obwodzie rezonansowym (UMP2),
  - zachowując w każdym okresie drgań obwodu rezonansowego wypełnienia dla każdego z kluczy zbliżone do 50%,
  - i przystosowany do pracy z czasem martwym pomiędzy przełączeniami dobranym tak, aby w tym czasie martwym potencjał na łącznikach prądowych (K1, K2, K3, K4) zdążył osiągnąć wartość bliską potencjałowi szyn zasilających,
- oraz w drugim trybie, przy małych obciążeniach wyjściowych, poniżej wartości progowej,
  - jest przystosowany do stabilizowania napięć lub prądów wyjściowych poprzez sekwencyjne wykradanie pełnych okresów drgań własnych obwodu rezonansowego poprzez zwieranie części łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) i włączanie pozostałych łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) i włączanie ich ponownie w fazie, w której przepływa przez te łączniki ujemny lub zerowy prąd.

10. Zasilacz według zastrz. 1, **znamienny tym**, że charakterystyka napięcia, prądu lub mocy wyjściowej od częstotliwości przełączania łączników prądowych (K1, K2, K3, K4) jest niejednoznaczna i składa się z dwóch obszarów, z których pierwszy od braku obciążenia do maksymalnego obciążenia charakteryzuje się zmniejszaniem częstotliwości pracy łączników prądowych (K1, K2, K3, K4), zaś drugi od maksymalnego obciążenia do zwarcia charakteryzuje się zwiększaniem częstotliwości pracy łączników prądowych (K1, K2, K3, K4).

## Rysunki

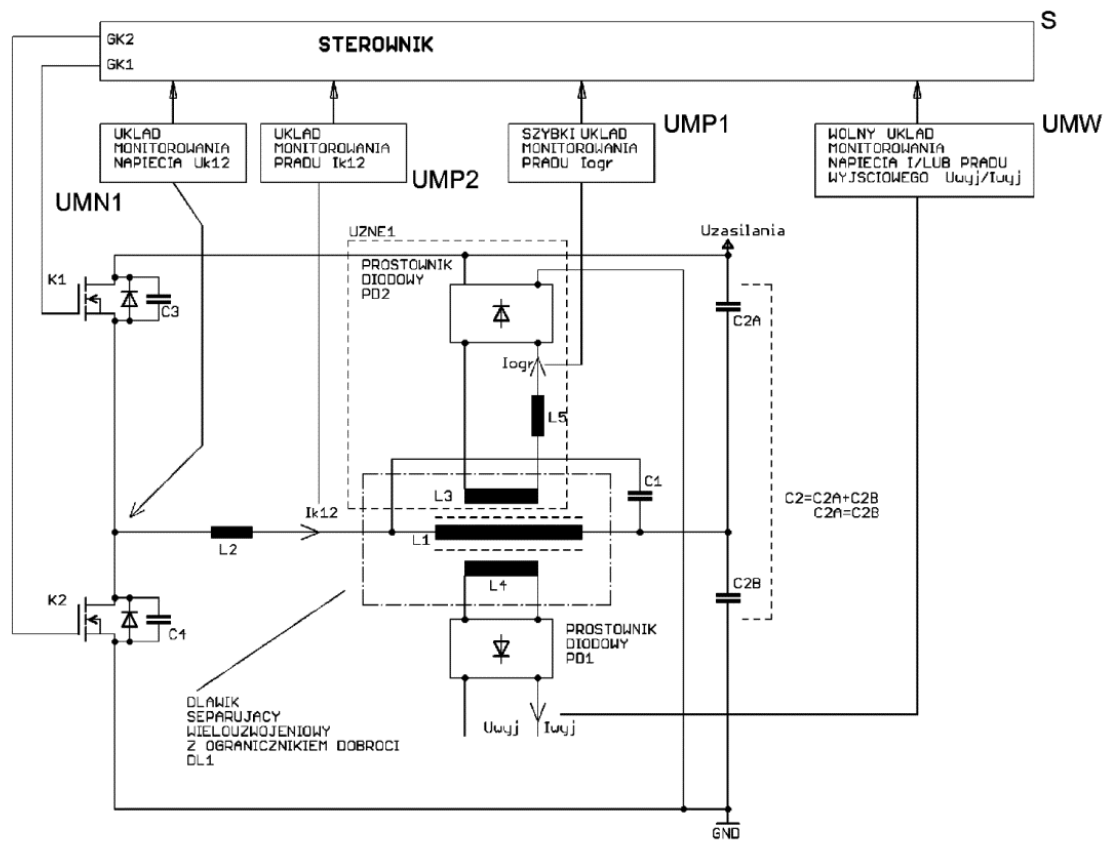


Fig. 1

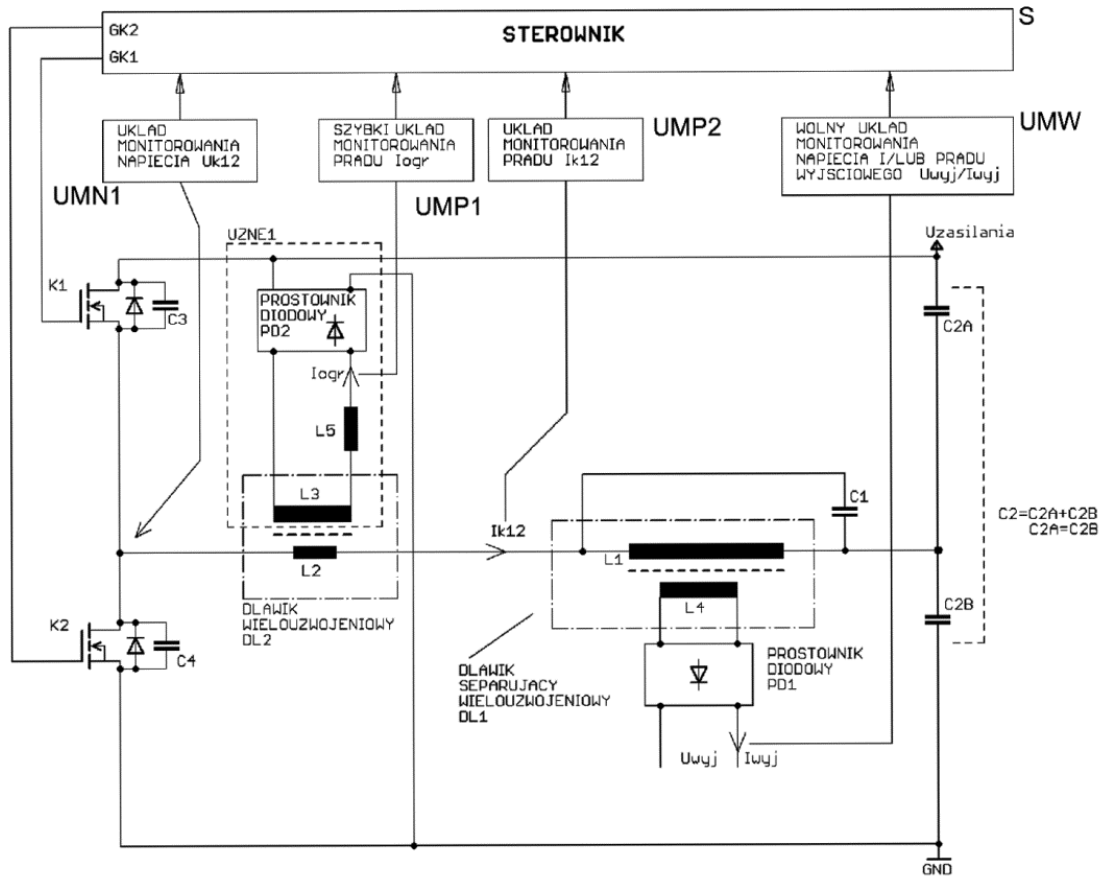


Fig. 2

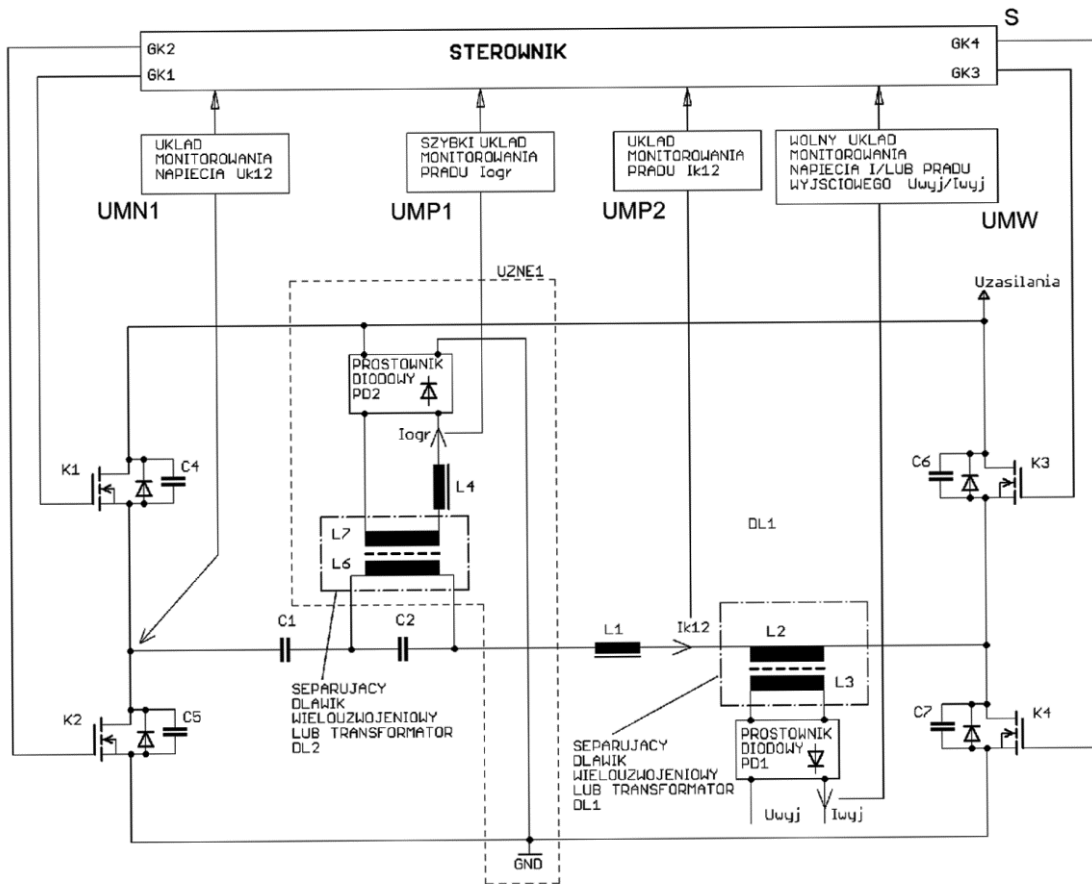


Fig. 3

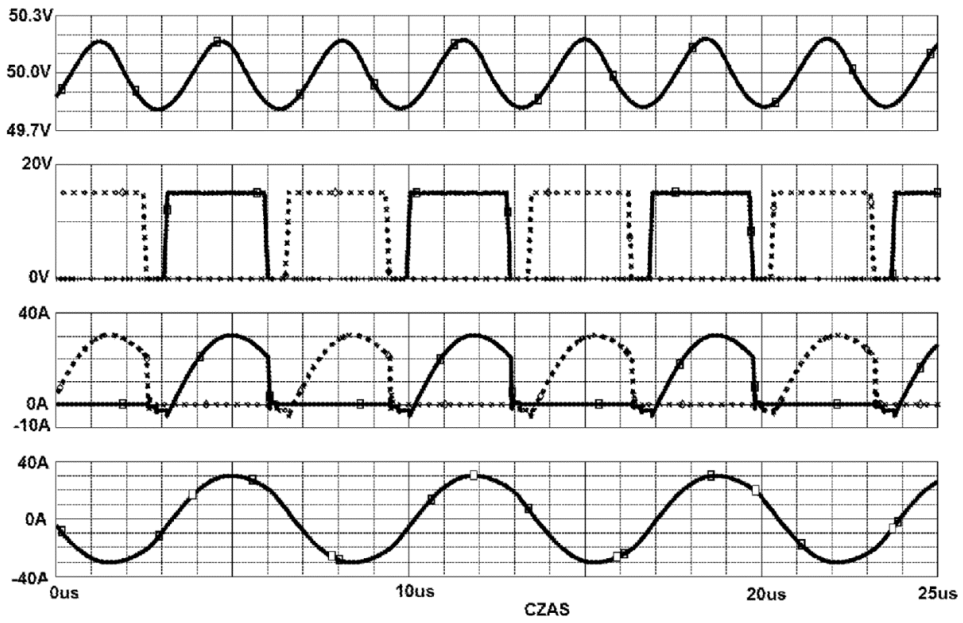


Fig. 4

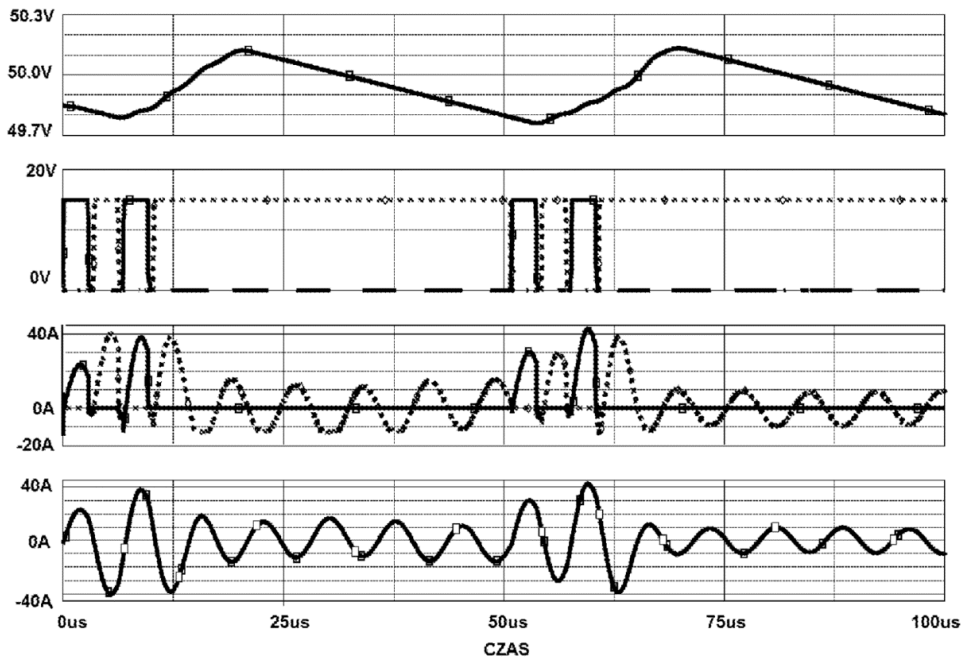


Fig. 5

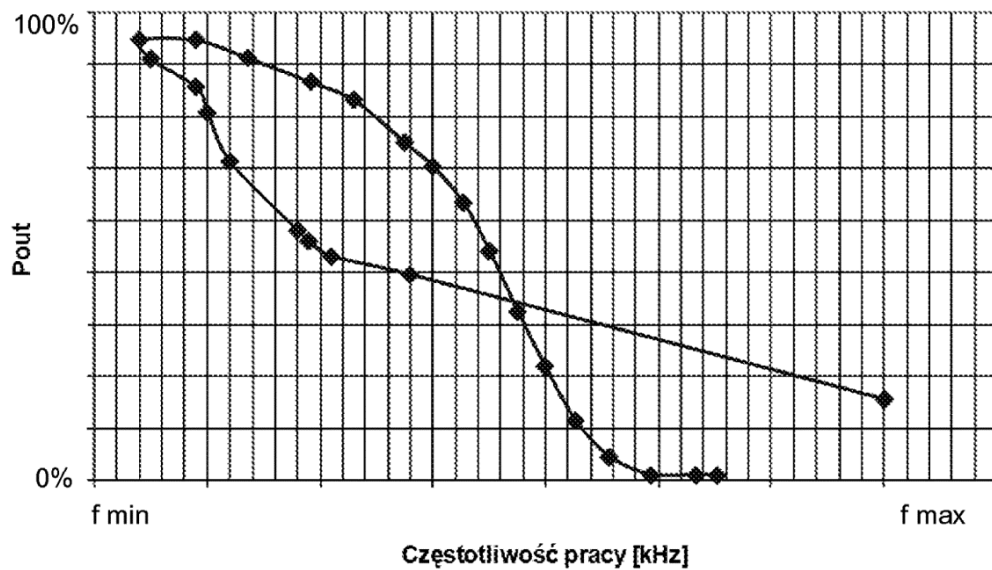


Fig. 6

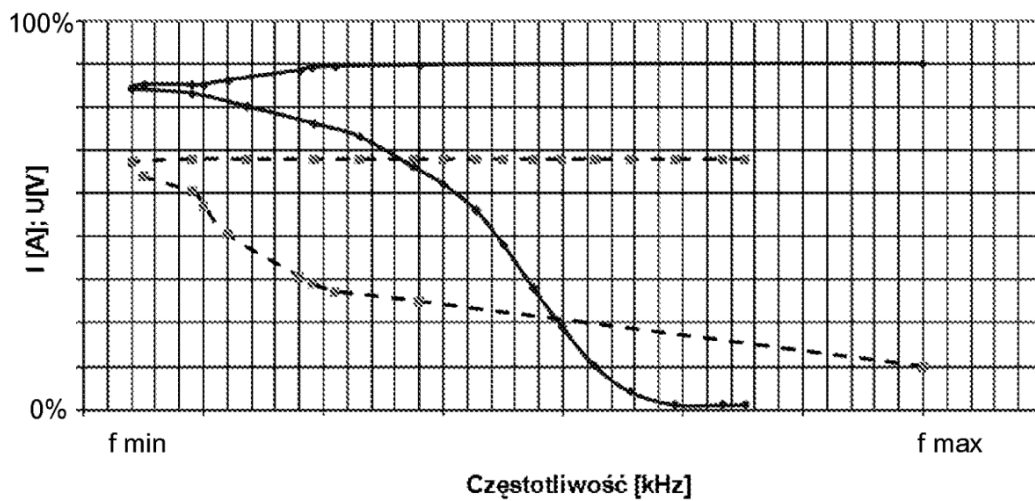


Fig. 7

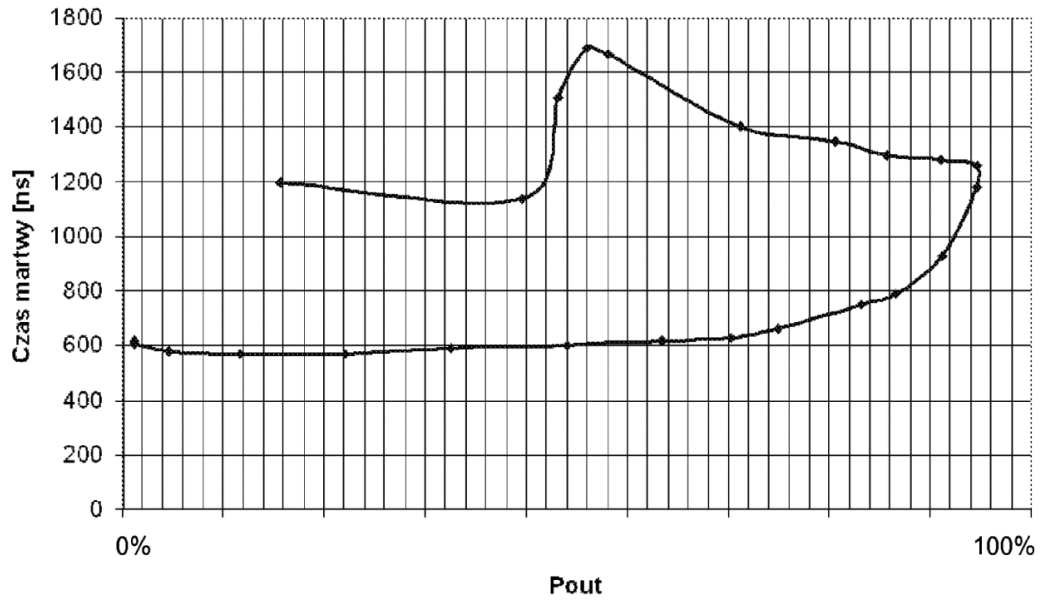


Fig. 8

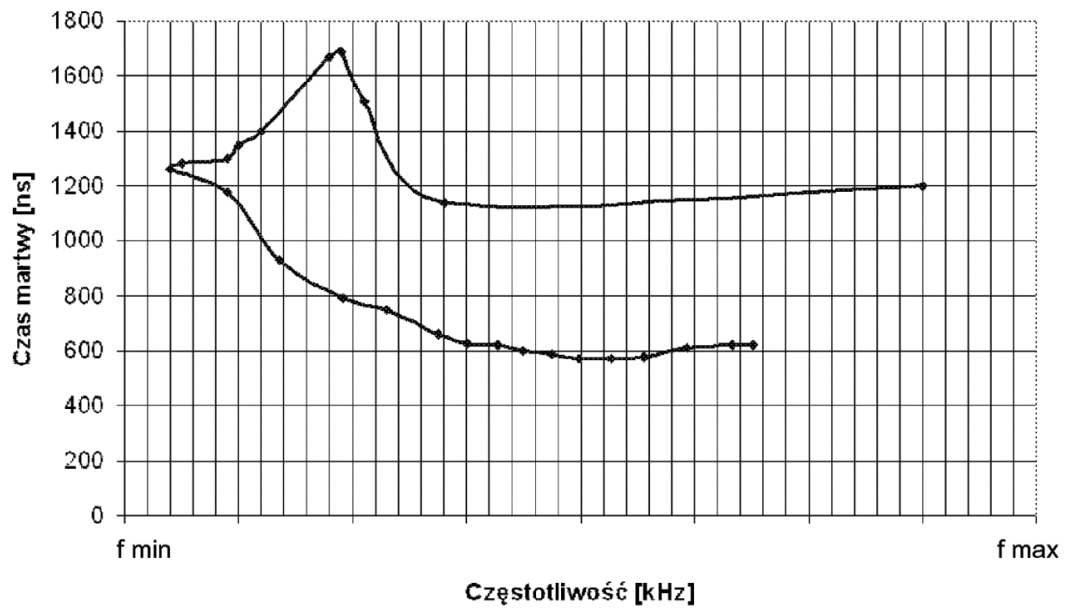


Fig. 9

