

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **239909**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **429999**

(22) Data zgłoszenia: **22.05.2019**

(51) Int.Cl.

H02J 3/01 (2006.01)

H02M 1/12 (2006.01)

(54) **Sposób oraz układ automatycznej regulacji dostrajanego filtra pasywnego**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

30.11.2020 BUP 25/20

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

24.01.2022 WUP 04/22

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
IM. TADEUSZA KOŚCIUSZKI, Kraków, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:

PIOTR DROZDOWSKI, Kraków, PL
DOMINIK MAMCARZ, Regulice, PL
DARIUSZ CHOLEWA, Kraków, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Andrzej Rogowski

PL 239909 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób oraz układ automatycznej regulacji parametrów dostrajanego filtra pasywnego, umożliwiający poprawę jakości energii elektrycznej w sieci zasilającej nieliniowe odbiorniki energii.

Większość odbiorników energii elektrycznej dołączonych do sieci zasilającej stanowią odbiorniki nieliniowe. Wszystkie te urządzenia podczas swojej normalnej pracy oddziałują na sieć zasilającą, pogarszając parametry jakościowe napięcia zasilającego. Pogarszanie się jakości energii elektrycznej w sieci zasilającej staje się coraz poważniejszym problemem. Występowanie wyższych harmoniczných prądu w sieci zasilającej może prowadzić do jej przeciążenia oraz ograniczenia przepustowości, a zmiany częstotliwości mogą powodować wzrost strat w urządzeniach elektromagnetycznych.

W celu poprawy jakości energii elektrycznej stosowane są układy filtrów. Do grupy najczęściej stosowanych, a także rozwiązań o najprostszej strukturze wpływających na ograniczenie zawartości wyższych harmoniczných w układach zasilających należą filtry pasywne. Filtry te są nastrojone na wybrane harmoniczne uznane za charakterystyczne dla danego odbiornika. W praktyce stosowane są grupy pasywnych filtrów w postaci pojedynczo strojonych układów projektowanych tak, aby każda z filtrowanych częstotliwości miała swój własny obwód filtracyjny dostrojony (poprzez odpowiedni dobór wartości indukcyjności i pojemności) do rezonansu szeregowego dla wybranej częstotliwości filtrowanej harmonicznej.

Zaletami filtrów pasywnych są ich prosta budowa i niska cena. Główną wadą jest ich odstojenie, które może być spowodowane zmianą częstotliwości napięcia zasilającego, zmianą parametrów odbiornika lub zmianą wartości elementów składowych filtru, np. wskutek starzenia się materiałów. W przypadku stosowania pasywnych filtrów wielogłęziowych uszkodzenie jednej z gałęzi pociąga za sobą konieczność wyłączenia filtrów dostrojonych do częstotliwości większych od tej, do której dostrojona jest gałąź uszkodzonego filtru, ze względu na niebezpieczeństwo wystąpienia rezonansu równoległego z siecią zasilającą.

Filtry aktywne, w porównaniu z filtrami pasywnymi, wyróżniają się wieloma zaletami, np. dużą stabilnością pracy, dokładnością, łatwością przestrajania częstotliwości, brakiem tłumienia sygnału użytkowego, eliminacją kosztownych elementów indukcyjnych. Mogą pracować w szerokim zakresie częstotliwości, generując sygnały prądu lub napięcia o częstotliwościach takich samych jak zakłócające lecz o przeciwnych fazach.

Połączenie energetycznych filtrów pasywnych LC z układami energetycznych filtrów aktywnych (EFA) nazywa się filtrami hybrydowymi (HEFA – hybrydowy energetyczny filtr aktywny).

Główną częścią filtru hybrydowego jest filtr pasywny eliminujący wyższe harmoniczne niższego rzędu. Natomiast układy EFA, w zależności od topologii filtru hybrydowego, pracują jako sterowanie źródła napięcia, albo jako źródła prądu dodatkowego. Ich zadaniem jest przede wszystkim poprawa właściwości kompensacyjno-filtrujących. Dołączenie filtru pasywnego do układu EFA pozwala poprawić jego właściwości energetyczne. W wyniku tego uzyskuje się zmniejszenie napięcia występującego na zaciskach lub prądu wyjściowego EFA. Przez to zmienia się również jego moc, co pozwala na zmniejszenie rozmiaru i ceny filtru. Duża popularność takiego rozwiązania wynika również z faktu znacznej ilości pracujących już w systemie elektroenergetycznym filtrów pasywnych.

Filtry aktywne i hybrydowe są urządzeniami przekształtnikowymi o złożonej budowie i wyrafinowanym sposobie sterowania, a techniki chroniące sieć zasilającą przed wnikaniem wyższych harmoniczných napięcia, realizowane w oparciu o ich wykorzystanie, są bardziej skomplikowane i kosztowne niż zastosowanie filtrów pasywnych.

W znanych z literatury filtrach pasywnych przestrajanych i dostrajanych regulacja odbywa się przez zmianę indukcyjności lub pojemności, ale po odłączeniu filtru od sieci zasilającej. Zmiana pasma tłumienia dla tych filtrów jest praktycznie nierealizowalna.

W związku z przedstawionymi wadami klasycznych filtrów pasywnych opracowany został filtr pasywny, który można przestajać w sposób ciągły lub skokowy, a jego układ został opisany w artykule: prof. V.I. Hudym, prof. O.L. Kovaliov, mgr D. Mamcarz, mgr J. Pawlik, „Vpliv elektrozvarúvalnogo agregata z kierovaním filtrom ctrumy na systemu elektropostačannâ”, Elektrotehnika i energetika, Donieck, No 1(16) 2014. Układ opisany w artykule zawiera filtr pasywny LC, przy czym element indukcyjny stanowi strona pierwotna transformatora natomiast strona wtórna obciążona jest dwójnikiem złożonym

z szeregowo połączonych regulowanych elementów R i L. Wartości elementów R i L decydują o właściwościach filtracyjnych. Koncepcja ujawniona w przedmiotowym artykule nie została zaprezentowana jako rozwiązanie techniczne nadające się do zastosowania przemysłowego.

Z niemieckiego opisu patentowego DE102005019215 znany jest układ przestrajania filtra, zawierający jako element indukcyjny transformator, którego uzwojenie pierwotne jest elementem filtra pasywnego LC, natomiast do uzwojenia wtórnego przyłączony jest układ prostownikowy obciążony impedancją regulowaną poprzez zawór, zbudowany na pojedynczym elemencie sterowanym (tranzystor IGBT) i służący do zmniejszania skuteczności filtracji. Układ i sposób przedstawiony w przedmiotowym patencie uniemożliwia nadążne sterowanie filtrem w warunkach, gdy moc obciążenia filtrowanego układu podlega dynamicznym zmianom.

Z polskiego zgłoszenia o numerze P. 420205 znany jest układ przestrajania filtra, który do uzwojenia wtórnego transformatora ma dołączony prostownik diodowy (umożliwiający zamianę napięcia przemiennego AC, na napięcie stałe DC) zasilający układ jednofazowego przekształtnika napięcia (zamiana napięcia stałego DC na napięcie AC). Takie rozwiązanie uniemożliwia oddawanie energii do sieci zasilającej, a tym samym dwukierunkowy przepływ energii (nie jest możliwe wysterowanie prostownika diodowego do pracy falowniczej), a do poprawnej pracy wymagana jest podwójna konwersja napięcia (AC/DC i DC/AC).

Z tego samego polskiego zgłoszenia o numerze P. 420205 znany jest sposób sterowania przestrajanego filtra pasywnego, w którym sygnał wzorcowy generowany jest na podstawie informacji dotyczącej podstawowej harmonicznej prądu oraz wartości chwilowej napięcia w sieci zasilającej. W rozwiązaniu tym istnieje konieczność rozkładu przebiegu prądu odbiornika na harmoniczne, co znacznie komplikuje sposób sterowania. Kolejną niedogodnością przedmiotowego rozwiązania jest problem związany z synchronizacją przebiegu wzorcowego z siecią zasilającą, polegający na możliwości kilkukrotnego przejścia przebiegu napięcia przez zero w czasie jednego okresu, co będzie skutkowało w dłuższej perspektywie wygenerowaniem błędnego sygnału wzorcowego. Problem ten może wystąpić w przypadku silnie odkształconego przebiegu napięcia zasilającego lub w przypadku wystąpienia zakłóceń w sieci elektroenergetycznej.

Celem wynalazku jest określenie sposobu automatycznego sterowania dostrajanym filtrem pasywnym na drodze energoelektronicznej, poprzez regulację obciążenia wtórnej strony transformatora, którego pierwotna strona stanowi element indukcyjny gałęzi przestrajalnego filtra pasywnego oraz zaprojektowanie układu sterowania, który na drodze energoelektronicznej umożliwia regulację parametrów obwodu głównego filtra, poprzez regulację obciążenia wtórnej strony transformatora.

Istotą sposobu sterowania dostrajanego filtra pasywnego według wynalazku jest jego regulowanie nadążne, na podstawie wyznaczonego uchybu, w oparciu o zmierzone sygnały prądów; płynącego w sieci zasilającej, płynącego przez układ filtra, prądu odbiornika, sygnału napięcia zasilającego oraz sygnału napięcia odbiornika.

Sposób według wynalazku charakteryzuje się tym, że sygnały prądu płynącego w linii zasilającej $i_z(t)$, prądu płynącego w obwodzie głównym filtra $i_F(t)$, prądu płynącego przez obwód odbiornika $i_o(t)$, napięcia w sieci zasilającej $u_z(t)$ oraz napięcia na odbiorniku $u_o(t)$, podawane są na wejścia przetworników analogowo-cyfrowych w celu dokonania dyskretyzacji mierzonych wielkości. Proces ten ma na celu uproszczenie sygnału analogowego do postaci skwantowanej, która może być dalej przetworzona przez urządzenia elektroniczne. Następnie na podstawie wartości chwilowych napięcia i prądu odbiornika generuje się sygnał wzorcowy. Metoda jego wyznaczania wykorzystuje teorię mocy Fryzego w dziedzinie czasu. Prąd płynący przez odbiornik jest rozkładany na składową czynną $i_{ocz}(t)$ oraz składową niereaktywną $i_{ob}(t)$.

$$i_{ob}(t) = i_o(t) - i_{ocz}(t) = i_{ref}(t)$$

gdzie:

$$i_{ocz} = \frac{P}{U_o^2} u_o(t) = G_o \cdot u_o(t)$$

- | | |
|----------|--|
| P | – moc czynna odbiornika, |
| U_o | – wartość skuteczna napięcia zasilającego odbiornik, |
| $u_o(t)$ | – wartość chwilowa napięcia odbiornika, |

$i_o(t)$ – wartość chwilowa prądu odbiornika,
 $G_o = \frac{P}{u_o^2}$ – wartość konduktancji zastępczej odbiornika.

Prąd zadany filtra $i_{ref}(t)$ obliczany jest w ten sposób, że na podstawie zmierzonych sygnałów chwilowych wartości prądu $i_o(t)$ i napięcia $u_o(t)$ obliczana jest wartość mocy czynnej pobieranej przez odbiornik oraz wartość skuteczna napięcia w celu określenia konduktancji zastępczej odbiornika G_o . Obliczenie tej wielkości jest niezbędne, aby dokonać rozkładu prądu płynącego przez odbiornik na składową czynną i niereaktywną. Składową czynną prądu odbiornika oblicza się jako iloczyn konduktancji G_o i wartości chwilowej napięcia na odbiorniku $u_o(t)$. Następnie, odejmując od zmierzonej wartości chwilowej prądu odbiornika $i_o(t)$ jej składową czynną $i_{ocz}(t)$, otrzymujemy przebieg prądu zadanego $i_{ref}(t)$ – część niereaktywną prądu odbiornika.

Zmierzone sygnały prądów i_z i i_F oraz wartość sygnału wzorcowego i_{ref} dzieli się przez wartość maksymalną prądu znamionowego odbiornika i_{omax} , co pozwala na obliczenie wartości względnej tych sygnałów. Prąd maksymalny odbiornika jest definiowany jako wartość prądu płynącego przez odbiornik podczas zasilania go napięciem znamionowym.

Następnie na podstawie wartości względnych prądu płynącego w linii zasilającej i_z^r i prądu płynącego w obwodzie głównym filtra i_F^r wyrażonymi w jednostkach względnych (indeks górny r wskazuje na jednostki względne – odniesione do wartości maksymalnej prądu odbiornika i_{omax}) oraz sygnału wzorcowego i_{ref}^r wyznacza się wartość uchybu zgodnie ze wzorem;

$$\Delta i^r = i_{ref}^r - i_z^r - i_F^r$$

Otrzymany sygnał Δi^r stanowi uchyb regulacji na wejściu regulatora prądu, który wyznacza na wyjściu sygnał proporcjonalny do u_s^r napięcia wyjściowego przekształtnika. Sygnał u_s^r steruje przekształtnikiem metodą modulacji szerokości impulsów PWM (Pulse-Width Modulation) – współczynnik modulacji amplitudy może zmieniać się w zakresie od 0,2 do 0,8.

Sygnał ten steruje pracą modulatora impulsów, generującego sygnały załączające tranzystory przekształtnika macierzowego, a zmiana czasu załączenia tranzystorów wpływa na kształt i wartość prądu w obwodzie wtórnym transformatora T_r . Sygnał wyjściowy komparatora – sygnał PWM – obliczany jest zgodnie ze wzorem:

$$q_{U1} = \text{sgn}(u_s^r - V_c)$$

$$q_{U2} = \text{sgn}(-u_s^r - V_c)$$

gdzie:

V_c – sygnał odniesienia, dany jest sygnałem piłokształtnym zmieniającym się od 0 do 1,

u_s^r – sygnał sterujący,

a na podstawie sygnału PWM generowane są sygnały sterujące poszczególnymi łącznikami przekształtnika macierzowego (taki rodzaj sterowania pozwala na ograniczenie przebiegów związanych z przerywaniem prądu w obwodzie z indukcyjnością), obliczany jest zgodnie ze wzorem:

$$Q_{T12} = \frac{1 - \text{sgn}(u_s^r)}{2} \cdot \left(\frac{1 - \text{sgn}(u_z)}{2} + \frac{(1 - \text{sgn}(q_{U2})) \cdot (1 + \text{sgn}(u_z))}{4} \right)$$

$$Q_{T21} = \frac{(1 - \text{sgn}(u_s^r)) \cdot (1 + \text{sgn}(q_{U2})) \cdot (1 + \text{sgn}(u_z))}{8}$$

$$Q_{T22} = \frac{(1 + \text{sgn}(u_s^r)) \cdot (1 - \text{sgn}(q_{U1})) \cdot (1 - \text{sgn}(u_z))}{8}$$

$$Q_{T31} = \frac{1 - \text{sgn}(u_s^r)}{2} \cdot \left(\frac{1 + \text{sgn}(u_z)}{2} + \frac{(1 - \text{sgn}(q_{U2})) \cdot (1 - \text{sgn}(u_z))}{4} \right)$$

$$Q_{T32} = \frac{1 + \operatorname{sgn}(u_s^r)}{2} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{sgn}(u_z)}{2} + \frac{(1 - \operatorname{sgn}(q_{u1})) \cdot (1 + \operatorname{sgn}(u_z))}{4} \right)$$

$$Q_{T41} = \frac{(1 + \operatorname{sgn}(u_s^r)) \cdot (1 + \operatorname{sgn}(q_{u1})) \cdot (1 + \operatorname{sgn}(u_z))}{8}$$

$$Q_{T42} = \frac{(1 - \operatorname{sgn}(u_s^r)) \cdot (1 + \operatorname{sgn}(q_{u2})) \cdot (1 - \operatorname{sgn}(u_z))}{8}$$

gdzie:

$$q_{u1} = \operatorname{sgn}(u_s^r - V_c)$$

$$q_{u2} = \operatorname{sgn}(-u_s^r - V_c)$$

u_s^r – sygnał sterujący,

q_{v1} – sygnał reprezentujący przebieg napięcia zasilającego,

q_{v1} – sygnał odniesienia, dany jest sygnałem piłokształtnym zmieniającym się od 0 do 1.

Sygnały załączające odpowiednie klucze tranzystorowe wypracowane są w oparciu o sygnał sterujący u_s^r , sygnał reprezentujący napięcie zasilające u_z oraz sygnał PWM q_{u1} lub q_{u2} . Wszystkie sygnały zostają przeskalowane tak aby przyjmować wartości 0 lub 1.

Sygnały załączające Q_{T11} , Q_{T12} , Q_{T31} oraz Q_{T32} przyjmują ogólną postać, którą można zapisać jako $A(B + C)$ gdzie: A – wyrażenie związane z sygnałem napięcia sterującego u_s^r , B – wyrażenie związane z sygnałem napięcia zasilającego u_z , C – iloczyn wyrażenia sygnału PWM q_{u1} lub q_{u2} i wyrażenia sygnału napięcia u_z . Tranzystor T_{11} , T_{12} , T_{31} lub T_{32} zostanie załączony, gdy całe wyrażenie przyjmuje wartość 1.

Sygnały załączające Q_{T21} , Q_{T22} , Q_{T41} oraz Q_{T42} przyjmują ogólną postać, którą można zapisać jako iloczyn wyrażen związanych z sygnałem napięcia sterującego u_s^r , sygnałem PWM q_{u1} lub q_{u2} i sygnałem napięcia u_z . Jeżeli iloczyn przyjmie wartość 1 zostaną załączone odpowiednie tranzystory T_{21} , T_{22} , T_{41} lub T_{42} .

Przedstawiony sposób sterowania opisany powyższymi wzorami polega na indywidualnym podawaniu sygnałów załączających łączniki przekształtnika tranzystorowego – jest to inne podejście niż znane ze sposobów sterowania przekształtnikiem macierzowym, w których steruje się obydwojema tranzystorami klucza energoelektronicznego. Sygnały sterujące $Q_{T11} - Q_{T42}$ przyjmują wartości 0 lub 1 w postaci ciągu impulsów o zmiennej szerokości wypełnienia. Sygnały te są wypracowywane na podstawie przebiegu sygnału sterującego u_s^r oraz sygnału napięcia zasilającego.

Istota układu, według wynalazku, dla realizacji sposobu sterowania filtrem pasywnym, składającego się z szeregowo połączonego kondensatora C i połączonego z nim szeregowo elementu indukcyjnego L w postaci dławika D oraz uzwojenia pierwotnej strony transformatora Tr, którego wtórna strona w postaci oddzielnego galwanicznie uzwojenia wtórnego L_2 , transformatora Tr, jest obciążona przez układ przekształtnikowy w postaci przekształtnika macierzowego obciążonego indukcyjnością L_d , przy czym sterowanie tranzystorami $T_{11} - T_{42}$ układu przekształtnikowego realizowane jest przez układ sterujący, którego odpowiednie wyjścia połączone są z wejściami bramkowymi odpowiednich tranzystorów $T_{11} - T_{42}$, a do wejść układu sterującego przyłączone są wyjścia: układu pomiaru napięcia w sieci zasilającej, układu pomiaru prądu płynącego w sieci zasilającej, układu pomiaru prądu płynącego w obwodzie głównym filtra, układu pomiaru prądu płynącego przez odbiornik oraz układu do pomiaru napięcia odbiornika.

Sterownie przekształtnika, na podstawie parametrów prądu płynącego w linii zasilającej, prądu płynącego w obwodzie głównym filtra, prądu płynącego przez odbiornik, napięcia sieci zasilającej oraz napięcia odbiornika, realizujące ciągłe dopasowywanie parametrów filtra do zmieniających się warunków zasilania, poprzez odpowiednią zmianą wartości obciążenia, które stanowi dwójnik o indukcyjności L.

Dostrajany automatycznie filtr pasywny według wynalazku składa się z obwodu głównego, którym jest kondensator połączony szeregowo z dławikiem i z uzwojeniem pierwotnym transformatora oraz obwodu sterowania, którym jest uzwojenie wtórne transformatora z dołączonym przekształtnikiem macierzowym obciążonym na wyjściu dwójnikiem w postaci dławika. Regulacja parametrów obwodu głównego filtra odbywa się poprzez zmianę czasu trwania załączania tranzystorów układu przekształtnikowego, który

wpływa na wartość prądu płynącego w obwodzie wtórnym dławika. W ten sposób realizowana jest dyskretna regulacja wartości indukcyjności dodatkowej dołączonej po stronie wtórnej transformatora filtra.

Wartość pojemności gałęzi głównej filtra jest obliczana na podstawie mocy biernej pobieranej przez odbiornik/odbiorniki, zgodnie z poniższym wzorem:

$$C_F = \frac{Q}{\omega U_C^2}$$

gdzie:

Q – moc bierna do skompensowania,

U_C – napięcie na kondensatorze,

ω – pulsacja obliczona dla podstawowej harmonicznej.

Indukcyjność dławika jest dobierana na podstawie widma harmonicznego prądu uzyskanych na podstawie pomiarów jakości energii elektrycznej w planowanym miejscu przyłączenia filtra – układ zawsze jest strojony na wyższe częstotliwości, np. na 13 harmoniczną, a jego dostrojenie odbywa przy użyciu indukcyjności dodatkowej. Wartość indukcyjności dławika obliczana jest ze wzoru:

$$L_D = \frac{1}{n^2 \omega^2 C_F}$$

gdzie:

n – numer harmonicznej, na którą ma być nastrojona główna gałąź filtra,

ω – pulsacja obliczona dla podstawowej harmonicznej.

Wartość indukcyjności dodatkowej L_d na wyjściu przekształtnika macierzowego, jaka powinna być nastawiona, oblicza się ze wzoru na częstotliwość rezonansową dla trzeciej harmonicznej obwodu głównego filtra i przelicza się ze strony pierwotnej na stronę wtórną transformatora Tr według wzoru:

$$L_d = \left(\frac{1}{36 \cdot \pi^2 \cdot f_1^2 \cdot C_F} - L_D - L_{Tr} \right) \cdot \left(\frac{U_{2Tr}}{U_{1Tr}} \right)^2$$

gdzie:

f_1 – wartość częstotliwości podstawowej harmonicznej,

C_F – wartość pojemności filtra strojonego,

L_D – wartość indukcyjności dławika D ,

L_{Tr} – wartość indukcyjności transformatora Tr ,

U_{1Tr} – wartość napięcia znamionowego strony pierwotnej transformatora Tr ,

U_{2Tr} – wartość napięcia znamionowego strony wtórnej transformatora Tr .

Przedmiot wynalazku został objaśniony na przykładzie wykonania i przedstawiony na rysunku na którym Fig 1 przedstawia ogólny schemat filtra przestrajalnego według wynalazku, Fig 2. przedstawia algorytm obliczeń zadanego prądu filtra a sterowania, Fig. 3 przedstawia schemat blokowy sterownia przekształtnikiem macierzowym, Fig 4 przedstawia wykresy przebiegów sygnałów sterujących poszczególnymi tranzystorami dla $sgn(u_z) > 0.$, Fig 5 przedstawia wykresy przebiegów sygnałów sterujących poszczególnymi tranzystorami dla $sgn(u_z) < 0.$, Fig 6 przedstawia przebieg prądu linii zasilającej oraz napięcia zasilającego przy włączonym filtrze, natomiast Fig. 7 przedstawia przebieg prądu linii zasilającej oraz napięcia zasilającego przy wyłączonym filtrze.

Dostrajalny jednogałęziowy filtr pasywny, stanowi połączenie szeregowo kondensatora C_F (3), dławika D (4) oraz pierwotnej strony L_1 , transformatora Tr (5). Układ filtra jest włączony równolegle do źródła zasilania U_s (1). Transformator Tr (5) posiada uzwojenie pierwotne L_1 będące elementem gałęzi głównej filtra LC, które jest sprzężone magnetycznie z uzwojeniem wtórnym L_2 , stanowiącym element gałęzi regulacyjnej filtra LC.

Do uzwojenia wtórnego L_2 dołączony jest układ przekształtnikowy zbudowany z przekształtnika macierzowego (6), regulowanego metodą modulacji szerokości impulsów (PWM) i obciążonego indukcyjnością L_d (7). Tranzystory przekształtnika macierzowego (6) sterowane są indywidualnie przez układ sterujący (13).

Odpowiednie wyjścia układu sterującego (13) dołączone są do wejść bramkowych tranzystorów T_{11} – T_{42} układu przekształtnikowego (6).

Do wejść układu sterującego (13) przyłączone są wyjścia: układu pomiaru napięcia w sieci zasilającej (8), układu pomiaru prądu płynącego w sieci zasilającej (9), układu pomiaru prądu płynącego przez odbiornik (11), układu pomiaru napięcia odbiornika (12) oraz układu pomiaru prądu płynącego w obwodzie głównym filtra (10).

Sygnały analogowe pochodzące z układów pomiarowych (8), (9), (10), (11) oraz (12) podawane na wejścia układu sterującego (13) poddane są dyskretyzacji. Układ sterujący (13), wykonany jest w technice cyfrowej z wykorzystaniem mikroprocesora.

W układzie (13) jest generowany sygnał wzorcowy, który stanowi prąd zadany filtra $i_{ref}(t)$. Sygnał wzorcowy obliczany jest w ten sposób, że na podstawie zmierzonych sygnałów chwilowych wartości prądu $i_o(t)$ i napięcia $u_o(t)$ obliczana jest wartość mocy czynnej pobieranej przez odbiornik oraz wartość skuteczna napięcia w celu określenia konduktancji zastępczej odbiornika G_o . Na jej podstawie możliwe jest obliczenie składowej czynnej prądu odbiornika, jako iloczynu konduktancji G_o i wartości chwilowej napięcia na odbiorniku $u_o(t)$. Następnie, odejmując od zmierzonej wartości chwilowej prądu odbiornika $i_o(t)$ jej składową czynną $i_{ocz}(t)$, otrzymujemy przebieg prądu zadanego $i_{ref}(t)$.

Sygnały cyfrowe reprezentujące prąd płynący w linii zasilającej i_z oraz prąd płynący w obwodzie głównym filtra i_F przeliczane są na wartości względne poprzez podzielenie ich wartości przez wartość maksymalną prądu znamionowego odbiornika I_{omax} . W ten sam sposób określana jest wartość względna prądu zadawanego. Układ sterowania oblicza wartość względną sygnału uchybu Δi^r według wzoru:

$$\Delta i^r = i_{ref}^r - i_z^r - i_F^r$$

Sposób regulacji oparty jest na regulatorze prądu, na wejście którego podawany jest względny sygnał uchybu Δi^r .

Na wyjściu regulatora otrzymuje się sygnał u_s^r sterujący napięciem wyjściowym przekształtnika (6).

Przykładowa realizacja układu według wynalazku została urzeczywistniona w skali laboratoryjnej w postaci gałęzi głównej filtra składającej się z kondensatora C_F o wartości 60 μ F ($U_{CN} = 400$ V), indukcyjności D o wartości L = 7 mH ($I_N = 24$ A) oraz strony pierwotnej transformatora Tr , która została przyłączana równolegle do źródła (1) sinusoidalnego napięcia zmiennego $U = 230$ V, do którego również równolegle przyłączone jest obciążenie (2) o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej. Transformator zainstalowany w układzie posiada następujące parametry: napięcie strony pierwotnej $U_1 = 2 \times 23$ V, napięcie strony wtórnej $U_2 = 230$ V, moc znamionowa $S_N = 2$ kVA. Do strony wtórnej transformatora Tr przyłączony jest przekształtnik macierzowy (6) składający się z ośmiu tranzystorów IGBT z diodą IRGP4062DPBF o prądzie $I_C = 48$ A i napięciu $U_{CE} = 600$ V, połączonych w mostek, w którym każda gałąź zawiera parę tranzystorów (gałąź pierwsza T_{11} i T_{12} , gałąź druga T_{21} i T_{22} , gałąź trzecia T_{31} i T_{32} oraz gałąź czwarta T_{41} i T_{42}). Przekształtnik macierzowy obciążony jest indukcyjnością dodatkową o wartości 269 mH ($I_N = 5$ A).

Układ automatycznej regulacji dostrojanego filtra pasywnego według wynalazku działa następująco:

Sygnały prądu płynącego w linii zasilającej, prądu płynącego w obwodzie głównym filtra, prądu płynącego przez obwód odbiornika, napięcia w sieci zasilającej oraz napięcia na odbiorniku, podawane są na wejścia przetworników analogowo-cyfrowych. Po ich dyskretyzacji wyznaczany jest przebieg prądu zadanego, a następnie obliczany sygnał uchybu, który steruje pracą regulatora prądu dającego na wyjściu sygnał napięcia sterującego, który steruje załączeniem i wyłączeniem tranzystorów przekształtnika macierzowego (6) zgodnie ze wzorami zapisanymi w zastrzeżeniu nr 2. Poprzez odpowiednie wysterowanie kluczy tranzystorowych możliwa jest zmiana prądu w obwodzie wtórnym transformatora – zmiana wartości indukcyjności (7) w sposób dyskretny. Każda zmiana parametrów obciążenia wpływa na zmianę przebiegu zadanego prądu filtra, pozwalając na jego dostrojenie.

W celu zilustrowania działania układu automatycznej regulacji dostrojanego filtra pasywnego według wynalazku na rysunku 6 przedstawiony jest przebieg prądu płynącego w linii zasilającej i_z , układu według wynalazku zrealizowanego w skali laboratoryjnej, oraz na rys. 7 przebieg napięcia zasilania u_z układu według wynalazku zrealizowanego w skali laboratoryjnej dla obciążenia (2), którym był jednofazowy prostownik tyrystorowy pracujący z kątem załączenia $v_z = 60^\circ$.

W przedziale od 0 do 0,1 s układ pracował bez załączonego filtra, a przebiegi prądu jak i napięcia są znacznie odkształcone. W chwili $t = 0,1$ s zostaje dołączony równolegle z odbiornikiem układ dostrojanego filtra pasywnego pracującego według wynalazku. W efekcie zmiane ulegają przebiegi napięcia

i prądu. W porównaniu z pracą bez filtra ich kształt jest znacznie bardziej zbliżony do regularnego i pozbawiony w znacznym stopniu wpływu wyższych harmonicznych.

Badanie funkcjonowania układu według wynalazku, który został zrealizowany w skali laboratoryjnej, wykazało skuteczność działania i pozytywny wpływ sposobu automatycznej regulacji parametrów filtra pasywnego na poprawę, jakości energii elektrycznej w sieci zasilającej obciążonej nieliniowym odbiornikiem energii o zmieniającym się obciążeniu.

Spis oznaczeń

- | | |
|----|--|
| 1 | – źródło zasilania – sieć zasilająca |
| 2 | – odbiornik nieliniowy |
| 3 | – kondensator filtra |
| 4 | – dławik filtra |
| 5 | – transformator Tr |
| 6 | – przekształtnik macierzowy |
| 7 | – indukcyjność dodatkowa |
| 8 | – przetwornik do pomiaru napięcia w sieci zasilającej |
| 9 | – przetwornik do pomiaru prądu płynącego w linii zasilającej |
| 10 | – przetwornik do pomiaru prądu płynącego w obwodzie głównym filtra |
| 11 | – przetwornik do pomiaru prądu płynącego przez odbiornik |
| 12 | – przetwornik do pomiaru napięcia odbiornika |
| 13 | – układ sterowania |

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób regulacji dostrajanego filtra pasywnego, przyłączonego równolegle do jednofazowej linii zasilającej, składającego się z szeregowo połączonych kondensatora C, dławika D i uzwojenia pierwotnego L_1 transformatora Tr, a do oddzielnego galwanicznie uzwojenia wtórnego L_2 , transformatora Tr, przyłączony jest układ przekształtnikowy, na wyjściu którego włączona jest szeregowo impedancja o znanych parametrach, zaś sterowanie odbywa się na podstawie parametrów prądu płynącego w linii zasilającej, prądu płynącego w obwodzie głównym filtra, prądu płynącego przez odbiornik oraz napięcia sieci zasilającej, **znamienny tym, że:**
 - sygnał prądu płynącego w linii zasilającej $i_z(t)$ podawany jest na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego (pomiar wartości chwilowej),
 - sygnał prądu płynącego w obwodzie głównym filtra $i_F(t)$ podawany jest na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego (pomiar wartości chwilowej),
 - sygnał prądu płynącego przez odbiornik $i_o(t)$, podawany jest na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego (pomiar wartości chwilowej),
 - sygnał napięcia odbiornika $u_o(t)$ podawany jest na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego (pomiar wartości chwilowej),
 - sygnał napięcia w sieci zasilającej $u_z(t)$ podawany jest na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego (pomiar wartości chwilowej),
 - oblicza się, na podstawie wartości chwilowej napięcia odbiornika $u_o(t)$ oraz prądu płynącego przez odbiornik $i_o(t)$ sygnał wzorcowy wyznaczany przy wykorzystaniu teorii mocy wg. Fryzego:

$$i_{ref}(t) = i_o(t) - i_{ocz}(t)$$

gdzie:

$$i_{ocz} = \frac{P}{U_o^2} u_o(t) = G_o \cdot u_o(t)$$

- P – moc czynna odbiornika,
 U_o – wartość skuteczna napięcia zasilającego odbiornik,
 $u_o(t)$ – wartość chwilowa napięcia odbiornika,

$i_o(t)$ – wartość chwilowa prądu odbiornika,

a składowa czynna prądu odbiornika $i_{ocz}(t)$ obliczana jest jako iloczyn konduktancji zastępczej G_o i wartości chwilowej napięcia na odbiorniku, natomiast w celu określenia konduktancji zastępczej odbiornika G_o na podstawie zmierzonych sygnałów chwilowych wartości prądu $i_o(t)$ i napięcia $u_o(t)$ obliczana jest wartość mocy czynnej pobieranej przez odbiornik oraz wartość skuteczna napięcia, zaś konduktancja jest wyrażona jako ich iloraz,

• wyznacza się wartości względne poprzez odniesienie zmierzonych sygnałów do wartości maksymalnej prądu znamionowego odbiornika i_{Omax} , a następnie na podstawie wartości względnych prądu płynącego w linii zasilającej i_z^r i prądu płynącego w obwodzie głównym filtra i_f^r oraz sygnału wzorcowego i_{ref}^r wyznacza się wartość uchybu zgodnie ze wzorem:

$$\Delta i^r = i_{ref}^r - i_z^r - i_f^r$$

a otrzymany sygnał Δi^r podaje się, jako uchyb regulacji, na wejście regulatora prądu, który wypracowuje sygnał u_s^r sterujący napięciem wyjściowym przekształtnika, za pomocą modulatora szerokości impulsów PWM, generującego sygnały załączające tranzystory przekształtnika macierzowego, a zmiana czasu załączenia tranzystorów wpływa na kształt i wartość prądu w obwodzie wtórnym transformatora T_r .

2. Sposób regulacji dostrojanego filtra pasywnego według zastrz. 1, **znamienny tym**, że sygnał wyjściowy komparatora – sygnał PWM – obliczany jest zgodnie ze wzorem:

$$q_{U1} = \text{sgn}(u_s^r - V_c)$$

$$q_{U2} = \text{sgn}(-u_s^r - V_c)$$

gdzie:

V_c . – sygnał odniesienia, dany jest sygnałem piłokształtnym zmieniającym się od 0 do 1,
 u_s^r – sygnał sterujący,

a na podstawie sygnału PWM, generowane są sygnały sterujące poszczególnymi łącznikami przekształtnika macierzowego, dane są wzorami:

$$Q_{T12} = \frac{1 - \text{sgn}(u_s^r)}{2} \cdot \left(\frac{1 - \text{sgn}(u_z)}{2} + \frac{(1 - \text{sgn}(q_{U2})) \cdot (1 + \text{sgn}(u_z))}{4} \right)$$

$$Q_{T21} = \frac{(1 - \text{sgn}(u_s^r)) \cdot (1 + \text{sgn}(q_{U2})) \cdot (1 + \text{sgn}(u_z))}{8}$$

$$Q_{T22} = \frac{(1 + \text{sgn}(u_s^r)) \cdot (1 - \text{sgn}(q_{U1})) \cdot (1 - \text{sgn}(u_z))}{8}$$

$$Q_{T31} = \frac{1 - \text{sgn}(u_s^r)}{2} \cdot \left(\frac{1 + \text{sgn}(u_z)}{2} + \frac{(1 - \text{sgn}(q_{U2})) \cdot (1 - \text{sgn}(u_z))}{4} \right)$$

$$Q_{T32} = \frac{1 + \text{sgn}(u_s^r)}{2} \cdot \left(\frac{1 - \text{sgn}(u_z)}{2} + \frac{(1 - \text{sgn}(q_{U1})) \cdot (1 + \text{sgn}(u_z))}{4} \right)$$

$$Q_{T41} = \frac{(1 + \text{sgn}(u_s^r)) \cdot (1 + \text{sgn}(q_{U1})) \cdot (1 + \text{sgn}(u_z))}{8}$$

$$Q_{T42} = \frac{(1 - \text{sgn}(u_s^r)) \cdot (1 + \text{sgn}(q_{U2})) \cdot (1 - \text{sgn}(u_z))}{8}$$

gdzie:

$$q_{U1} = \operatorname{sgn}(u_s^r - V_C)$$

$$q_{U2} = \operatorname{sgn}(-u_s^r - V_C)$$

u_s^r – sygnał sterujący,

u_z – sygnał reprezentujący przebieg napięcia zasilającego,

V_C – sygnał odniesienia, dany jest sygnałem piłokształtnym zmieniającym się od 0 do 1.

3. Układ regulacji dostrajanego filtra pasywnego przyłączonego równolegle do jednofazowej linii zasilającej, składającego się z szeregowo połączonych kondensatora C, dławika D i uzwojenia pierwotnego L_1 transformatora Tr, a do oddzielnego galwanicznie uzwojenia wtórnego L_2 , transformatora Tr, przyłączony jest przekształtnik macierzowy, na wyjściu którego włączona jest szeregowo impedancja o znanych parametrach, zaś sterowanie odbywa się na podstawie parametrów prądu płynącego w linii zasilającej, prądu płynącego w obwodzie głównym filtra, prądu płynącego przez odbiornik, napięcia odbiornika oraz napięcia sieci zasilającej, **znamienny tym**, że gałąź główna dostrajanego filtra zbudowana jest z szeregowo połączonych kondensatora C_F (3), dławika filtra D (4) oraz uzwojenia pierwotnego transformatora Tr (5), do uzwojenia wtórnego podłączony jest przez układ przekształtnikowy w postaci przekształtnika macierzowego (6) obciążonego indukcyjnością L_d (7), przy czym sterowanie tranzystorami $T_{11}-T_{42}$ układu przekształtnikowego (6) realizowane jest przez układ sterujący (13), którego odpowiednie wyjścia połączone są z wejściami bramkowymi odpowiednich tranzystorów $T_{11}-T_{42}$, a do wejść układu sterującego (13) przyłączone są wyjścia: układu pomiaru napięcia w sieci zasilającej (8), układu pomiaru prądu płynącego w sieci zasilającej (9), układu pomiaru prądu płynącego w obwodzie głównym filtra (10), układu pomiaru prądu płynącego przez odbiornik (11) oraz układu do pomiaru napięcia odbiornika (12).
4. Układ regulacji dostrajanego filtra pasywnego według zastrz. 3, **znamienny tym**, że wartość indukcyjności dodatkowej L_d , na wyjściu przekształtnika macierzowego (6) oblicza się, ze wzoru na częstotliwość rezonansową dla trzeciej harmonicznej obwodu głównego filtra i przelicza się ze strony pierwotnej na stronę wtórną transformatora Tr według wzoru:

$$L_d = \left(\frac{1}{36 \cdot \pi^2 \cdot f_1^2 \cdot C_F} - L_D - L_{Tr} \right) \cdot \left(\frac{U_{2Tr}}{U_{1Tr}} \right)^2$$

gdzie:

f_1 – wartość częstotliwości podstawowej harmonicznej,

C_F – wartość pojemności filtra strojonego,

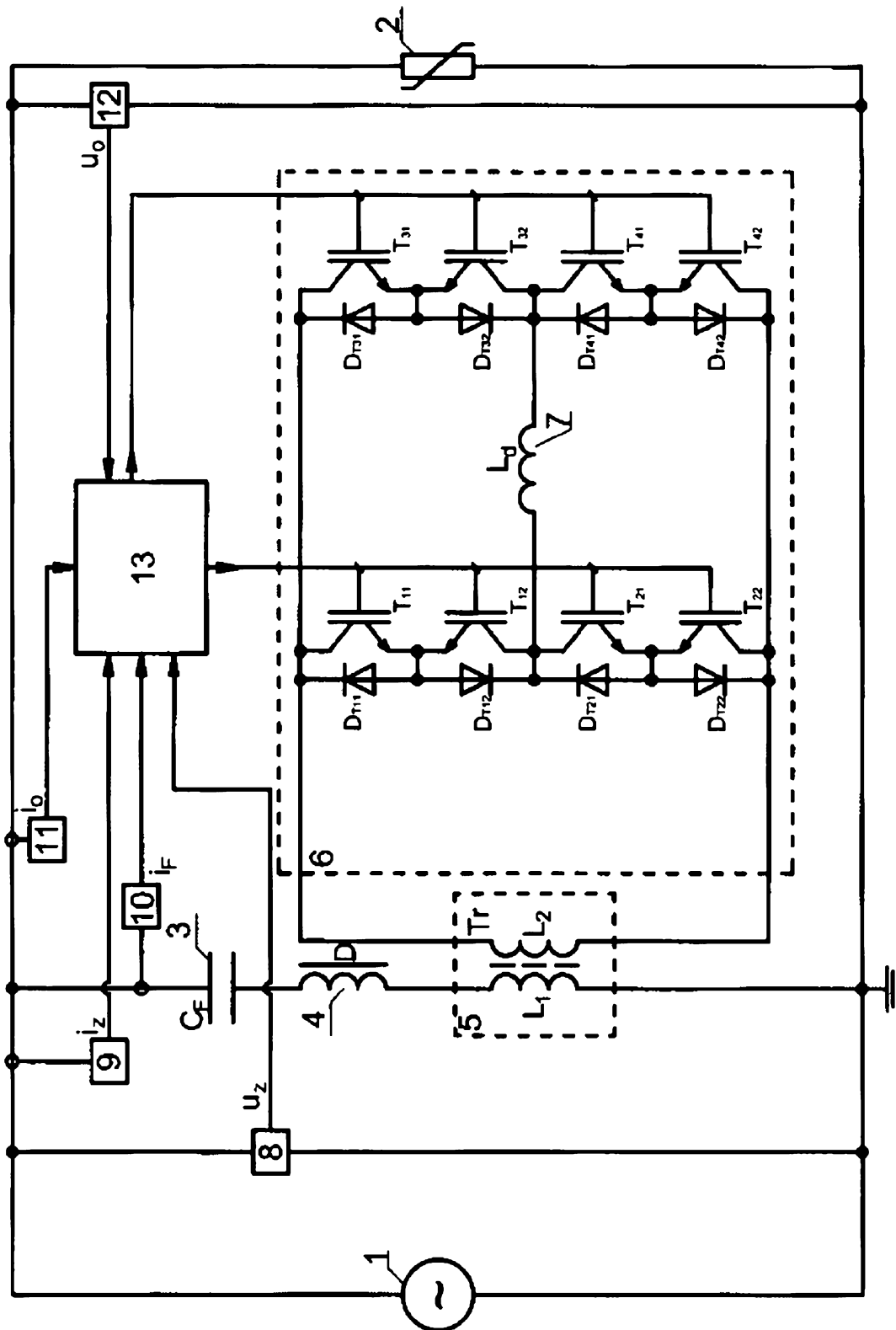
L_D – wartość indukcyjności dławika D,

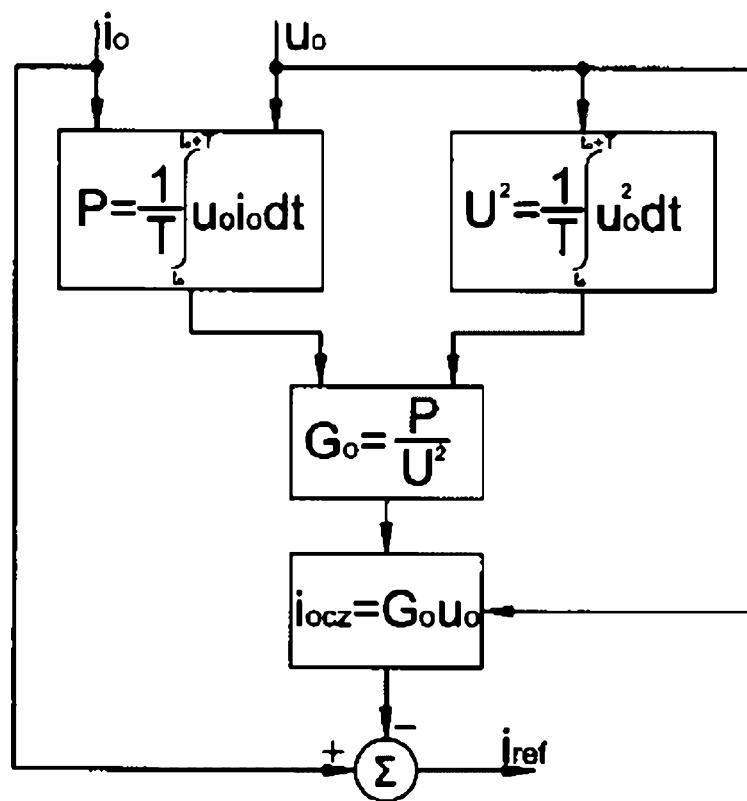
L_{Tr} – wartość indukcyjności transformatora Tr,

U_{Tr1} – wartość napięcia znamionowego strony pierwotnej transformatora Tr,

U_{2Tr} – wartość napięcia znamionowego strony wtórnej transformatora Tr.

Rysunki



**Fig.2**

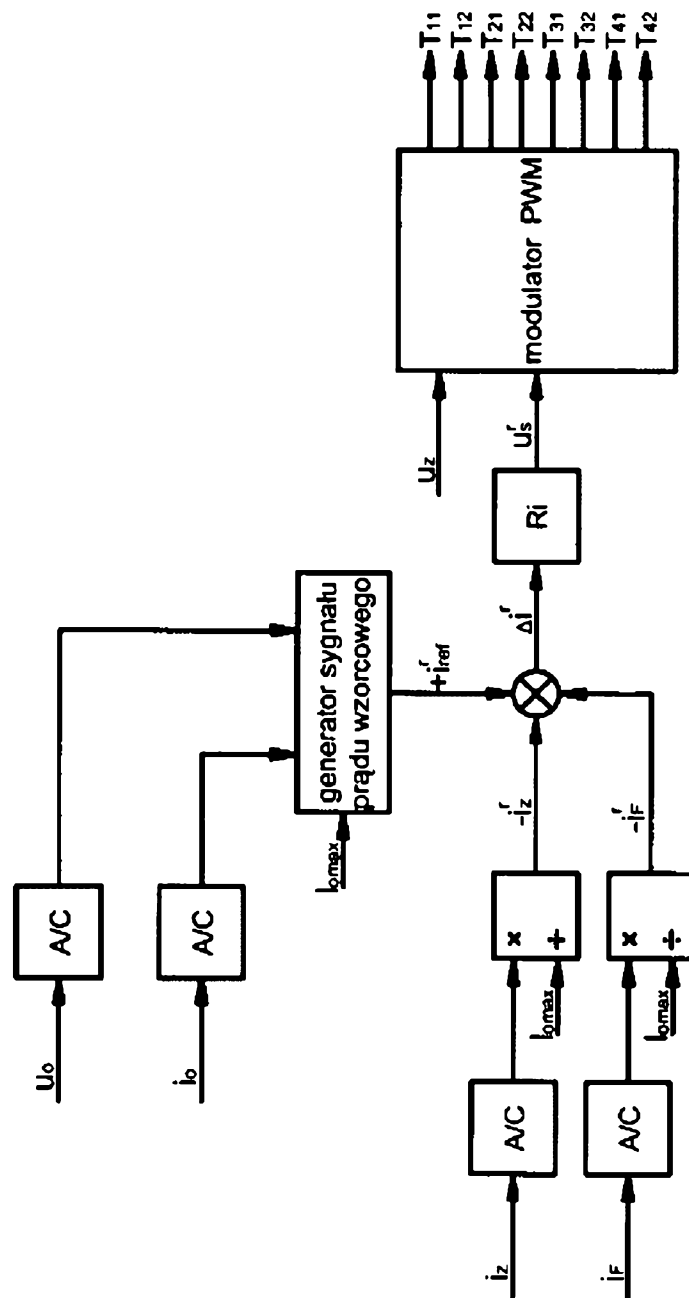


Fig. 3

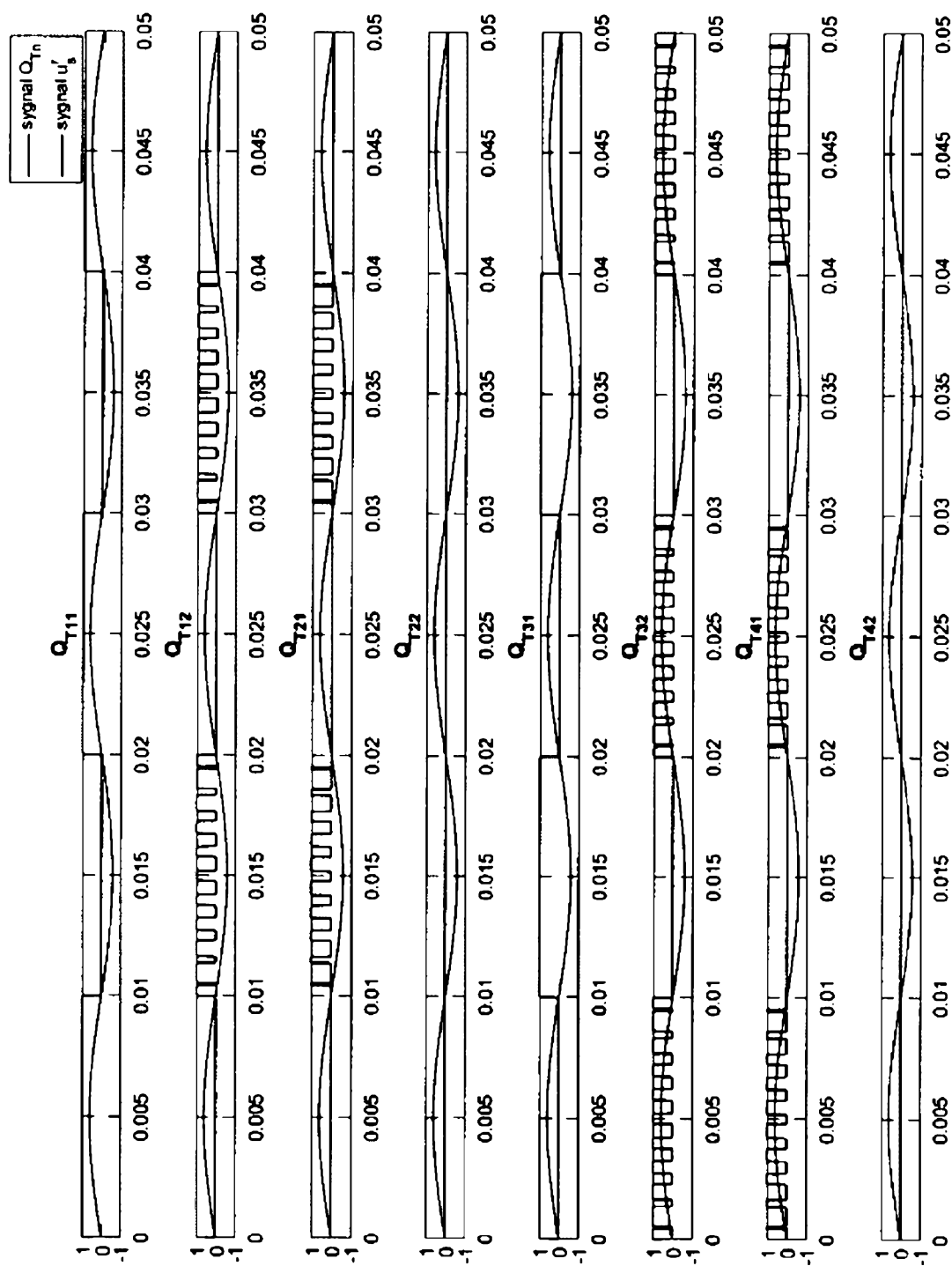


Fig. 4

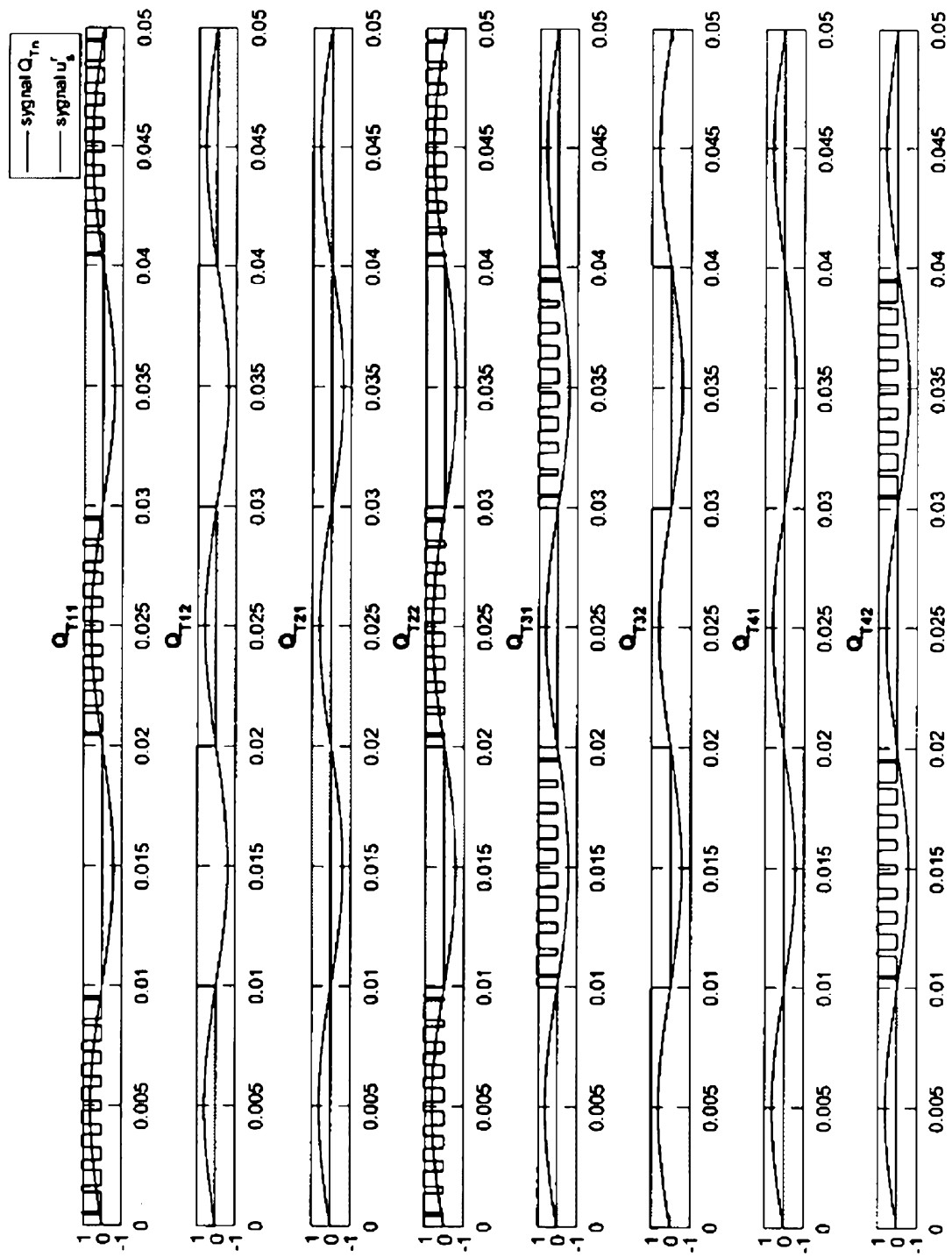
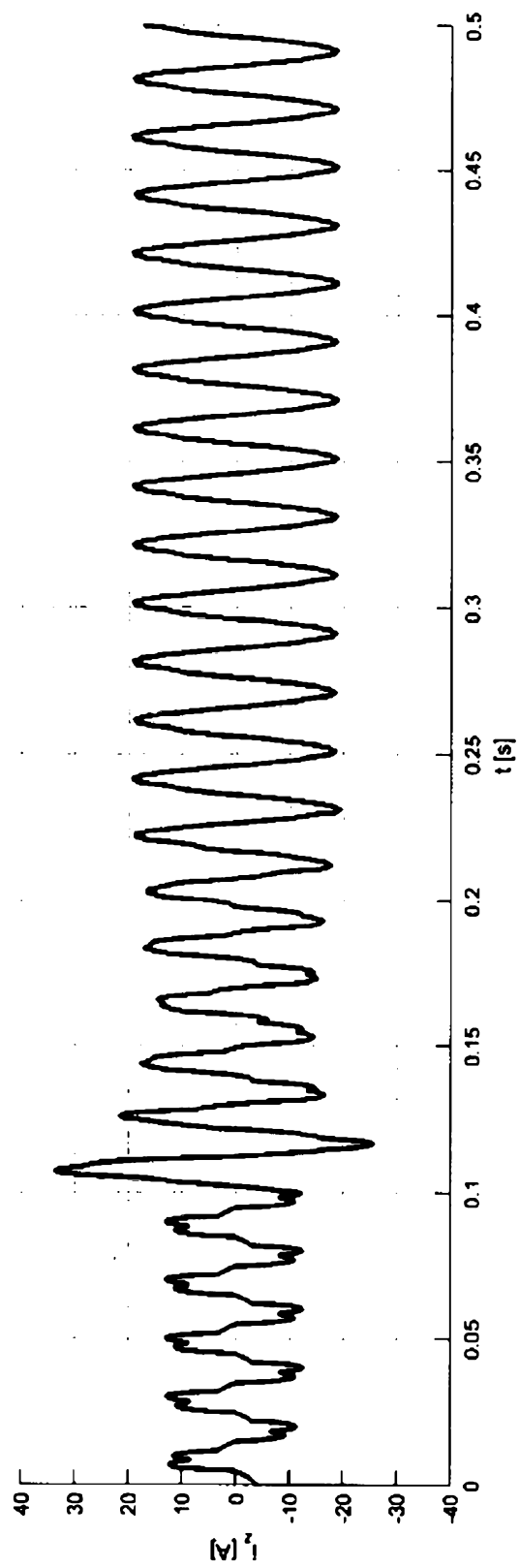


Fig. 5

**Fig. 6**

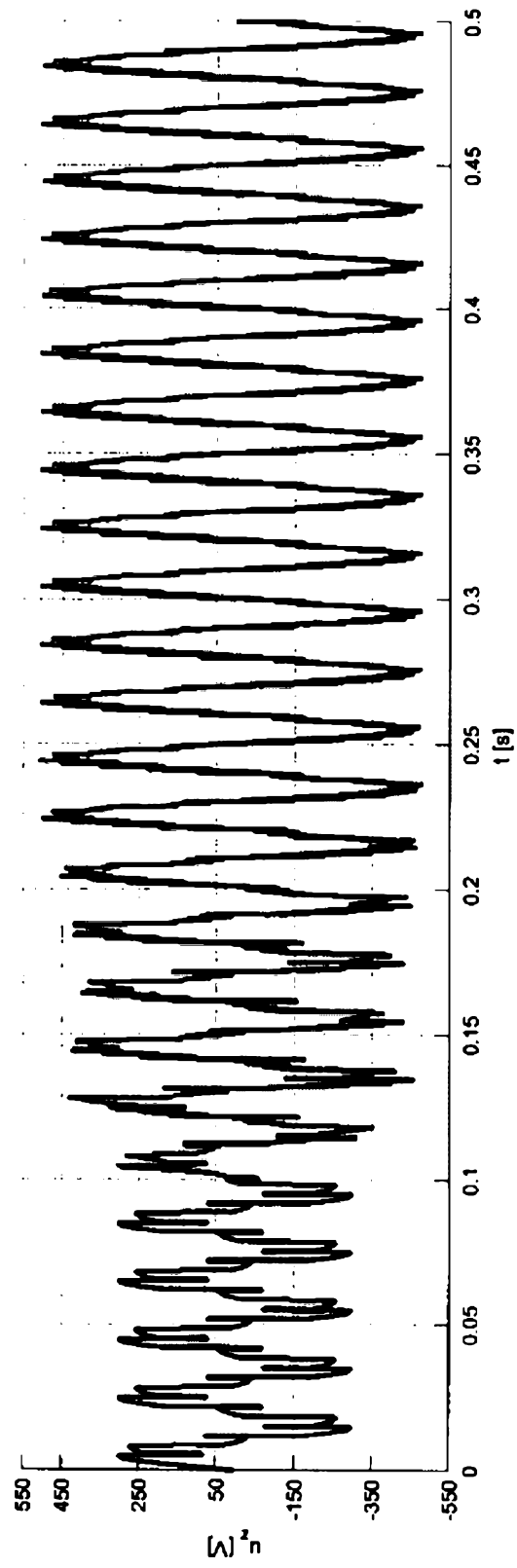


Fig. 7