

(19)



URZĄD  
PATENTOWY  
RZECZYPOSPOLITEJ  
POLSKIEJ

(10) **PL 246417 B1**

(12)

## Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **428400**

(22) Data zgłoszenia: **2018.08.07**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2020.02.24 BUP 05/2020**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2025.01.27 WUP 04/2025**

(51) MKP:

**H03K 3/84 (2006.01)**

**G06F 7/58 (2006.01)**

(30) Pierwszeństwo:

**P.422484 2017.08.08 PL**

**P.422485 2017.08.08 PL**

**P.422488 2017.08.08 PL**

**P.422489 2017.08.08 PL**

**P.422490 2017.08.08 PL**

**P.422491 2017.08.08 PL**

**P.425580 2018.05.17 PL**

**P.425582 2018.05.17 PL**

**P.425583 2018.05.17 PL**

**P.425584 2018.05.17 PL**

**P.425587 2018.05.17 PL**

**P.425588 2018.05.17 PL**

**P.425589 2018.05.17 PL**

**P.426575 2018.08.07 PL**

**P.426576 2018.08.07 PL**

(86) Zgłoszenie międzynarodowe (PCT):

**2018.08.07 PCT/IB18/055937**

(87) Publikacja zgłoszenia międzynarodowego (PCT):

**2019.02.14 WO19/030667**

(73) Uprawniony z patentu:

**POLITECHNIKA WARSZAWSKA, Warszawa, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

**KRZYSZTOF GOŁOFIT, Warszawa, PL**

**PIOTR WIECZOREK, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:

**rzecz. pat. Oliwia Czarnocka, Warszawa, PL**

(54) Tytuł:

**Generator losowy**

**PL 246417 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest generator losowy przeznaczony zwłaszcza do generacji liczb i ciągów liczbowych prawdziwie losowych.

W stanie techniki znane są konstrukcje generatorów losowych, w których wykorzystuje się pary generatorów pierścieniowych i układy bistabilne, takie jak detektor fazy, czy układ metastabilnościowy.

Znany jest w stanie techniki, np. z publikacji Piotra Z. Wieczorka, „Secure TRNG with Random Phase Stimulation”, XL-th IEEE-SPIE Joint Symposium on Photonics, Web Engineering, Electronics for Astronomy and High Energy Physics Experiments, Wilga 2017, SPIE volume 10445, ISBN: 9781510613546, Electronic ISBN: 9781510613553, generator losowy, który zawiera dwa generatory pierścieniowe oraz układ metastabilnościowy. Wyjścia generatorów pierścieniowych dołączone są do wejść układu metastabilnościowego, natomiast wyjście układu metastabilnościowego jest wyjściem generatora losowego. Generator pierścieniowy składa się z linii opóźniającej zamkniętej w pętlę, której wejście i wyjście są ze sobą połączone i dołączone do wyjścia generatora losowego. Linia opóźniająca składa się z elementów opóźniających połączonych w szereg i włączonych pomiędzy wejściem i wyjściem tej linii. Wadą takiego generatora losowego jest jego mała szybkość związana z rzadko występującymi zdarzeniami mogącymi zainicjować metastabilną pracę układu metastabilnościowego, co wynika z wolno kroczących przypadkowych zmian fazy (ang. random walk in phase lub phase walk).

Z publikacji niemieckiego zgłoszenia patentowego nr DE19618098 oraz z publikacji amerykańskiego zgłoszenia patentowego nr US2011169580, znane są generatory losowe, w których wyjścia dwóch generatorów pierścieniowych dołączone są do wejść detektora fazy, natomiast wyjście detektora fazy jest wyjściem generatora losowego. Wadą takich generatorów losowych jest mała losowość i mała szybkość działania takich układów związana z wolnymi przypadkowymi zmianami fazy.

Ze stanu techniki, np. z publikacji amerykańskich zgłoszeń patentowych nr US5153532, US2002156819 i US2006069706, znane są generatory losowe, w których zastosowano sumowanie – przy użyciu bramki XOR – sygnałów wyjściowych z dwóch lub wielu generatorów pierścieniowych.

Z publikacji patentu amerykańskiego nr US5007087, znana jest konstrukcja generatora losowego oparta na analogowym układzie chaotycznym z ciągłymi zmiennymi. Wadą takich generatorów jest to, że nie da się ich zaimplementować w cyfrowych układach programowalnych, a w związku z tym trudno jest wykorzystać do ich produkcji współczesne linie technologiczne.

Z publikacji amerykańskiego zgłoszenia patentowego o numerze US2014101217, znana jest konstrukcja generatora losowego oparta na cyfrowym układzie chaotycznym, w którym sprzężenie zwrotne ma charakter dyskretny. Wadą takich generatorów jest to, że mają skończoną liczbę stanów układu.

Z publikacji amerykańskiego zgłoszenia patentowego o numerze US2004264233, znany jest generator pierścieniowy z przełączaną ścieżką propagacji, który zawiera dwie linie opóźniające połączone ze sobą tak, że wyjście pierwszej linii dołączone jest do wejścia drugiej linii, której wejście i wyjście dołączone są do sterowanego klucza przełączającego, którego wyjście dołączone jest do wejścia pierwszej linii. Linie opóźniające zawierają elementy opóźniające połączone w szeregi.

Z publikacji chińskiego zgłoszenia patentowego o numerze CN105954596, znany jest generator pierścieniowy z regulowaną szybkością, który zawiera linię opóźniającą, której wejście i wyjście jest ze sobą połączone oraz która zawiera elementy opóźniające połączone w szeregi. Do linii opóźniającej, między wyjściem jednego elementu opóźniającego i wejściem następnego, dołączane są kondensatory przy pomocy sterowanych kluczy, co pozwala na zmianę częstotliwości generatora pierścieniowego.

Z publikacji amerykańskiego zgłoszenia patentowego o numerze US2017126218, znany jest sterowany element opóźniający, zawierający szereg bramek transmisyjnych włączanych pomiędzy inwerter, a masę tego inwertera, regulujących prąd przełączania się inwertera, a przez to szybkość inwertera.

Dodatkowo z publikacji amerykańskiego zgłoszenia patentowego o numerze US2014351305 znany jest system i sposób dynamicznego sterowania sprzężeniem zwrotnym dostrajania generatora liczb losowych, w którym generator liczb losowych zawiera pierwszy obwód wytwarzający losową sekwencję wartości, przy czym pierwszy obwód ma regulowane wejście, które zmienia entropię losowej sekwencji liczb oraz drugi obwód odbierający losową sekwencję wartości z pierwszego obwodu i wytwarzający sygnał wyjściowy wskazujący stopień entropii losowej sekwencji wartości i trzeci obwód, który reguluje regulowane wejście pierwszego obwodu w odpowiedzi na sygnał wyjściowy drugiego obwodu.

Celem wynalazku jest zapewnienie niedeterministycznej inicjalizacji wielu procesów metastabilnościowych, wywołanie procesu korekcji fazy, a także wywołanie procesu chaotycznego, uzyskanie losowego zaburzenia działania procesu korekcji fazy oraz uzyskanie sygnału losowego i jednocześnie monitorującego układ korekcji fazy.

Istota wynalazku polega na tym, że generator losowy zawierający układ bistabilny, którego wyjście jest dołączone do wyjścia generatora losowego oraz zawierający przynajmniej dwa generatory pierścieniowe, które są podłączone do wejść układu bistabilnego zgodnie z wynalazkiem cechuje się tym, że przynajmniej jeden generator pierścieniowy jest generatorem pierścieniowym z regulowaną szybkością, oraz tym że wyjście przynajmniej jednego układu bistabilnego, którego wejścia są połączone z generatorami pierścieniowymi jest dołączone do przynajmniej jednego wejścia sterującego generatorem pierścieniowym z regulowaną szybkością. Generator losowy posiada drugi układ bistabilny, którego pierwsze wejście jest dołączone do jednego generatora pierścieniowego, a drugie wejście jest dołączone do innego generatora pierścieniowego, a wyjście jest dołączone do drugiego wyjścia generatora losowego. Taka konstrukcja sprawia, że zamiast zwykłego generatora losowego uzyskuje się układ chaotyczny. Ponadto, zmienną w sprzężeniu zwrotnym układu chaotycznego jest nie tylko wartość logiczna, lecz także czas, dzięki czemu układ wykazuje cechy właściwe analogowym układom chaotycznym mimo, że jest zaimplementowany cyfrowo. Dzięki temu do jego wykonania można stosować współczesne linie produkcyjne nie rezygnując z korzystnych właściwości układów analogowych.

Korzystnie przynajmniej jedno wyjście przynajmniej jednego układu bistabilnego dołączone jest do przynajmniej jednego wejścia sterującego generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością przez układ sterujący. Zastosowanie układu sterującego umożliwia wprowadzanie zmian do sygnału sprzężenia zwrotnego, a w konsekwencji poprawę pracy układu chaotycznego.

Korzystnie, przynajmniej jedno wyjście przynajmniej jednego układu bistabilnego dołączone jest do przynajmniej jednego wejścia sterującego generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością przez układ sterujący, a do drugiego wejścia układu sterującego dołączone jest wyjście innego układu bistabilnego. Takie rozwiązanie pozwala na losowe zaburzenie sprzężenia zwrotnego.

Korzystnie, przynajmniej jeden układ bistabilny jest detektorem fazy. Detektor fazy zapewnia precyzyjne wykrywanie pierwszeństwa zboczy przebiegów wejściowych, które wykorzystywane jest do korekcji fazy.

Korzystnie, przynajmniej jeden układ bistabilny jest układem metastabilnościowym. Takie rozwiązanie zapewnia losową odpowiedź układu w przypadku bliskości zboczy przebiegów wejściowych. Ścisłej, dla przesunięć fazowych nie mieszczących się w oknie metastabilnościowym układ metastabilnościowy realizuje detekcję fazy i służy do korekcji fazy dołączonych do jego wejść generatorów pierścieniowych. Natomiast dla przesunięć fazowych mieszczących się w oknie metastabilnościowym układ metastabilnościowy zapewnia losową wartość na swoim wyjściu i wskutek tego wprowadza przypadkową zmianę fazy, czym różni się od detektora fazy. Ponadto, układ metastabilnościowy wprowadza do pętli sprzężenia zwrotnego opóźnienie, co rozszerza zakres występujących przesunięć fazowych w dołączonych do jego wejść generatorach pierścieniowych.

Korzystnie, przynajmniej jeden generator pierścieniowy zawiera przynajmniej jedną linię opóźniającą, której wejście i wyjście są ze sobą połączone i dołączone do wyjścia generatora pierścieniowego, przy czym linia opóźniająca zawiera elementy opóźniające połączone w szereg.

Korzystnie, przynajmniej jeden generator pierścieniowy z regulowaną szybkością zawiera przynajmniej jedną linię opóźniającą, której wejście i wyjście są ze sobą połączone i dołączone do wyjścia generatora z regulowaną szybkością, przy czym linia opóźniająca zawiera elementy opóźniające połączone w szereg.

Korzystnie, przynajmniej jeden generator pierścieniowy z regulowaną szybkością zawiera przynajmniej jeden dodatkowy element wprowadzający opóźnienie, dołączany do linii opóźniającej do wyjścia jednego elementu opóźniającego za pomocą klucza, którego wejście sterujące dołączone jest do wejścia sterującego generatorem pierścieniowym z regulowaną szybkością. Takie rozwiązanie pozwala na regulację częstotliwości generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością, a co za tym idzie na regulację fazy względem innego generatora.

Korzystnie, przynajmniej jeden generator pierścieniowy z regulowaną szybkością zawiera linię opóźniającą, w którą jest włączony szeregowo przynajmniej jeden sterowany element opóźniający, zaś wejście sterujące sterowanego elementu opóźniającego dołączone jest do wejścia sterującego generatorem pierścieniowym z regulowaną szybkością. Takie rozwiązanie pozwala na regulację częstotliwości

generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością, a co za tym idzie na regulację fazy względem innego generatora.

Korzystnie, sterowany element opóźniający zawiera przynajmniej dwa tranzystory polowe o przeciwnym typie przewodnictwa, których dreny i źródła są parami połączone i jedna para dołączona jest do wejścia sterowanego elementu opóźniającego, druga para dołączona jest do wyjścia sterowanego elementu opóźniającego, a wejście sterujące sterowanego elementu opóźniającego dołączone jest do bramek obydwu tranzystorów polowych. Takie rozwiązanie pozwala na zróżnicowanie opóźnień wprowadzanych przez sterowany element opóźniający bardzo małym kosztem, gdyż tranzystory o przeciwnym typie przewodnictwa włączają się przy przeciwnych stanach logicznych na ich bramkach.

Korzystnie, stosunek długości do szerokości kanału jednego tranzystora polowego przewyższa stosunek długości do szerokości kanału drugiego tranzystora polowego. Takie rozwiązanie zapewnia regulację opóźnień wprowadzanych przez sterowany element opóźniający przez regulację geometrią kanałów tranzystorów.

Korzystnie, w szereg z przynajmniej jednym z tranzystorów polowych włączony jest przynajmniej jeden element opóźniający. Takie rozwiązanie zapewnia dodatkowe opóźnienie wprowadzane w linii wybranego tranzystora.

Korzystnie, pomiędzy bramki tranzystorów polowych a wejście sterujące sterowanego elementu opóźniającego włączony jest przynajmniej jeden inwerter. Takie rozwiązanie zapewnia przeciwną pracę tranzystorów sterowanych tym samym sygnałem, dzięki czemu wywołuje przeciwną zmianę częstotliwości w dwóch komplementarnych generatorach pierścieniowych z regulowaną szybkością.

Korzystnie przynajmniej jeden generator pierścieniowy z regulowaną szybkością jest generatorem pierścieniowym z przełączaną ścieżką propagacji. Takie rozwiązanie pozwala na regulację częstotliwości generatora pierścieniowego z przełączaną ścieżką propagacji, a co za tym idzie na regulację fazy względem innego generatora.

Korzystnie, generator pierścieniowy z przełączaną ścieżką propagacji zawiera przynajmniej dwie linie opóźniające połączone ze sobą tak, że wyjście pierwszej linii opóźniającej dołączone jest do wejścia drugiej linii opóźniającej, a wyjście jednej z tych linii opóźniających dołączone jest do wyjścia generatora pierścieniowego z przełączaną ścieżką propagacji, przy czym linie opóźniające zawierają elementy opóźniające połączone w szeregi.

Korzystnie, generator pierścieniowy z przełączaną ścieżką propagacji zawiera przynajmniej jeden multiplexer, którego wejście sterujące dołączone jest do wejścia sterującego generatora pierścieniowego z przełączaną ścieżką propagacji, oraz którego wyjście dołączone jest do wejścia jednej linii opóźniającej, oraz którego wejścia dołączone są wejścia i wyjścia innej linii opóźniającej.

Generator losowy korzystnie zawiera przynajmniej dwa układy metastabilnościowe, włączone w linie opóźniające tak, że ich końcówki są odseparowane w liniach opóźniających przynajmniej jednym elementem opóźniającym. Takie rozwiązanie sprawia, że układy opóźniające są obciążane układami metastabilnościowymi w sposób minimalny.

Korzystnie, przynajmniej jeden układ metastabilnościowy jest włączony pierwszą końcówką w szereg elementów opóźniających składających się na linie opóźniające jednego generatora pierścieniowego, za elementem opóźniającym o pierwszym numerze w tym szeregu licząc od elementu opóźniającego dołączonego wejściem do wyjścia generatora pierścieniowego, a drugą końcówką jest włączony w szereg elementów opóźniających składających się na linie opóźniające drugiego generatora pierścieniowego, za elementem opóźniającym o drugim numerze w tym szeregu licząc od elementu opóźniającego dołączonego wejściem do wyjścia generatora pierścieniowego tak, że pierwszy numer jest różny od drugiego numeru. Takie rozwiązanie sprawia, że układ metastabilnościowy jest pobudzany sygnałem wejściowym o innym przesunięciu fazowym niż przesunięcie fazowe występujące w danej chwili czasu w generatorach pierścieniowych.

Korzystnie, przynajmniej dwa układy metastabilnościowe są włączone przynajmniej jedną końcówką każdy w tym samym miejscu przynajmniej jednej linii opóźniającej. Dołączenie różnych układów metastabilnościowych w tym samym miejscu sprawia, że są one pobudzane dokładnie tym samym sygnałem.

Korzystnie, przynajmniej jeden układ sterujący zawiera przynajmniej jeden element opóźniający. Opóźnienie w pętli sprzężenia zwrotnego powoduje szerszy zakres przesunięć fazowych między generatorami pierścieniowymi.

Korzystnie, przynajmniej jeden układ sterujący zawiera bramkę dodawania losowości, której pierwsze wejście stanowi wejście danych losowych układu sterującego, drugie wejście stanowi wejście

sygnałowe układu sterującego, a wyjście bramki dodawania losowości stanowi wyjście układu sterującego. Takie rozwiązanie pozwala na losowe zaburzenie sprzężenia zwrotnego.

Korzystnie, pierwsze wejście bramki dodawania losowości dołączone jest do wejścia danych losowych układu sterującego przez układ bramkujący, a do układu bramkującego dołączony jest układ sterowania bramkowaniem.

Korzystnie, drugie wejście bramki dodawania losowości oraz jej wyjście połączone są w szereg z co najmniej jednym elementem opóźniającym, przy czym wejście pierwszego w szeregu elementu dołączone jest do wejścia sygnałowego układu sterującego, a wyjście ostatniego w szeregu elementu dołączone jest do wyjścia układu sterującego.

Korzystnie, pierwsze wejście bramki dodawania losowości dołączone jest do wejścia danych losowych układu sterującego przez układ bramkujący, a do układu bramkującego dołączony jest układ sterowania bramkowaniem, zaś drugie wejście bramki dodawania losowości oraz jej wyjście połączone są w szereg z co najmniej jednym elementem opóźniającym, przy czym wejście pierwszego w szeregu elementu dołączone jest do wejścia sygnałowego układu sterującego, a wyjście ostatniego w szeregu elementu dołączone jest do wyjścia układu sterującego.

Korzystnie, przynajmniej jeden detektor fazy stanowi przerzutnik o dwóch wejściach stanowiących wejścia detektora fazy i wyjściu stanowiącym wyjście detektora fazy.

Korzystnie, przynajmniej jeden detektor fazy zawiera dwa przerzutniki o dwóch wejściach i dwóch wyjściach każdy, który ma wejścia przerzutników dołączone do wejść detektora fazy i który ma wyjścia przerzutników dołączone do wyjść detektora fazy, przy czym pierwsze wejście detektora fazy dołączone jest jednocześnie do pierwszego wejścia pierwszego przerzutnika i drugiego wejścia drugiego przerzutnika, drugie wejście detektora fazy dołączone jest jednocześnie do drugiego wejścia pierwszego przerzutnika i pierwszego wejścia drugiego przerzutnika, a wyjście detektora fazy dołączone jest do wybranych wyjść przerzutników przez układ logiczny.

Korzystnie, przynajmniej jeden układ metastabilnościowy stanowi przerzutnik o dwóch wejściach stanowiących wejścia układu metastabilnościowego i wyjściu stanowiącym wyjście układu metastabilnościowego.

Korzystnie, przynajmniej jeden układ metastabilnościowy zawiera układ metastabilnościowy z oscylacyjną odpowiedzią impulsową o dwóch wejściach stanowiących wejścia układu metastabilnościowego i wyjściu stanowiącym wyjście układu metastabilnościowego.

Korzystnie, wyjście układu metastabilnościowego z oscylacyjną odpowiedzią impulsową dołączone jest do wyjścia układu metastabilnościowego przez sumator.

Korzystnie, układ metastabilnościowy zawiera układ liczący, którego wyjścia dołączone są do kolejnych wejść sumatora, a którego wejście dołączone jest do wyjścia układu metastabilnościowego z oscylacyjną odpowiedzią impulsową.

Korzystnie, przynajmniej jeden układ metastabilnościowy zawiera generator metastabilnościowych interwałów czasowych o wejściach dołączonych do wejść układu metastabilnościowego oraz wyjściach dołączonych do wejść arbitra, którego wyjścia dołączone są do wyjść układu metastabilnościowego przez układ logiczny.

Korzystnie, generator metastabilnościowych interwałów czasowych zawiera dwa przerzutniki o dwóch wejściach i pojedynczych wyjściach, przy czym wejścia przerzutników generatora metastabilnościowych interwałów czasowych dołączone są do wejść układu metastabilnościowego w taki sposób, że pierwsze wejście układu metastabilnościowego dołączone jest jednocześnie do pierwszego wejścia pierwszego przerzutnika i pierwszego wejścia drugiego przerzutnika, drugie wejście układu metastabilnościowego dołączone jest jednocześnie do drugiego wejścia pierwszego przerzutnika i drugiego wejścia drugiego przerzutnika, natomiast arbiter zawiera dwa przerzutniki o dwóch wejściach i dwóch wyjściach każdy, przy czym wyjścia przerzutników generatora metastabilnościowych interwałów czasowych dołączone są do wejść przerzutników arbitra w taki sposób, że wyjście pierwszego przerzutnika generatora metastabilnościowych interwałów czasowych dołączone jest jednocześnie do pierwszego wejścia pierwszego przerzutnika arbitra i drugiego wejścia drugiego przerzutnika arbitra, wyjście drugiego przerzutnika generatora metastabilnościowych interwałów czasowych dołączone jest jednocześnie do drugiego wejścia pierwszego przerzutnika arbitra i pierwszego wejścia drugiego przerzutnika arbitra, zaś układ logiczny stanowi bramka koniunkcji, przez którą wybrane wyjścia przerzutników arbitra dołączone są do wyjścia układu metastabilnościowego.

Wynalazek umożliwia jednoczesną generację wielu niezależnych ciągów liczb losowych dzięki niestabilności rozwiązania wielu procesów metastabilnościowych, jak również umożliwia kontrolę procesu korekcji fazy oraz procesu chaotycznego.

Fig. 1 i fig. 2 przedstawiają przykłady wykonania generatora losowego nieobjęte niniejszym wynalazkiem, przy czym fig. 1 przedstawia schemat blokowy generatora losowego z generatorem pierścieniowym, generatorem pierścieniowym z regulowaną szybkością i układem bistabilnym, a fig. 2 przedstawia schemat blokowy generatora losowego z dwoma generatorami pierścieniowymi z regulowaną szybkością i układem bistabilnym. Przedmiot wynalazku jest przedstawiony w przykładzie wykonania na rysunku, na którym:

fig. 3 przedstawia schemat blokowy generatora losowego z generatorem pierścieniowym i generatorem pierścieniowym z regulowaną szybkością, układem metastabilnościowym oraz detektorem fazy,

fig. 4 przedstawia schemat blokowy generatora losowego z dwoma generatorami pierścieniowymi z regulowaną szybkością, układem metastabilnościowym, detektorem fazy oraz układem sterującym o pojedynczym wejściu,

fig. 5 przedstawia schemat blokowy generatora losowego z generatorem pierścieniowym i generatorem pierścieniowym z regulowaną szybkością, układem metastabilnościowym, detektorem fazy oraz układem sterującym o dwóch wejściach,

fig. 6 przedstawia schemat blokowy generatora losowego z dwoma generatorami pierścieniowymi z regulowaną szybkością, układem metastabilnościowym, detektorem fazy oraz układem sterującym o dwóch wejściach,

fig. 7 przedstawia schemat blokowy generatora pierścieniowego,

fig. 8 przedstawia schemat blokowy pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością,

fig. 9 przedstawia schemat blokowy drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością,

fig. 10 przedstawia schemat blokowy trzeciego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością,

fig. 11 przedstawia schemat blokowy sterowanego elementu opóźniającego zawierającego dwa tranzystory polowe,

fig. 12 przedstawia schemat blokowy sterowanego elementu opóźniającego zawierającego dwa tranzystory polowe oraz dodatkowe opóźnienia włączone w szereg z jednym tranzystorem polowym,

fig. 13 przedstawia schemat blokowy sterowanego elementu opóźniającego z inwersją sygnału sterowania,

fig. 14 przedstawia schemat blokowy pierwszego generatora pierścieniowego z przełączaną ścieżką propagacji,

fig. 15 przedstawia schemat blokowy drugiego generatora pierścieniowego z przełączaną ścieżką propagacji,

fig. 16 przedstawia pierwszy szczegółowy schemat blokowy generatora losowego opartego na dwóch generatorach pierścieniowych z regulowaną szybkością z dołączonym szeregiem układów metastabilnościowych,

fig. 17 przedstawia drugi szczegółowy schemat blokowy generatora losowego opartego na dwóch generatorach pierścieniowych z regulowaną szybkością z dołączonym szeregiem układów metastabilnościowych,

fig. 18 przedstawia szczegółowy schemat blokowy generatora losowego opartego na dwóch generatorach pierścieniowych z przełączaną ścieżką propagacji z dołączonym szeregiem układów metastabilnościowych,

fig. 19 przedstawia schemat blokowy układu sterującego zbudowanego z elementów opóźniających,

fig. 20 przedstawia schemat blokowy układu sterującego zbudowanego z bramki dodawania losowości,

fig. 21 przedstawia schemat blokowy układu sterującego zbudowanego z bramki dodawania losowości oraz układu bramkującego,

fig. 22 przedstawia schemat blokowy układu sterującego zbudowanego z bramki dodawania losowości oraz elementów opóźniających,

fig. 23 przedstawia schemat blokowy układu sterującego zbudowanego z bramki dodawania losowości, układu bramkującego i elementów opóźniających,

fig. 24 przedstawia schemat blokowy detektora fazy zbudowanego z jednego przerzutnika,  
fig. 25 przedstawia schemat blokowy detektora fazy zbudowanego z dwóch przerzutników,  
fig. 26 przedstawia schemat blokowy układu metastabilnościowego zbudowanego z przerzutnika,  
fig. 27 przedstawia schemat blokowy układu metastabilnościowego zbudowanego z układu metastabilnościowego z oscylacyjną odpowiedzią impulsową,  
fig. 28 przedstawia schemat blokowy układu metastabilnościowego zbudowanego z układu metastabilnościowego z oscylacyjną odpowiedzią impulsową oraz sumatora,  
fig. 29 przedstawia schemat blokowy układu metastabilnościowego zbudowanego z układu metastabilnościowego z oscylacyjną odpowiedzią impulsową, sumatora i układu liczącego, natomiast  
fig. 30 – schemat blokowy układu metastabilnościowego zbudowanego z generatora metastabilnościowych interwałów czasowych oraz arbitra.

Dla lepszego zrozumienia wynalazku fig. 1 i fig. 2 przedstawiają przykłady realizacji generatora losowego nieobjęte niniejszym wynalazkiem. Generator losowy przedstawiony na fig. 1 zawiera generator pierścieniowy GP oraz generator pierścieniowy z regulowaną szybkością GPRS, których wyjścia o-GP i o-GPRS dołączone są do wejść i1-UB i i2-UB układu bistabilnego UB. Wyjście układu bistabilnego o-UB dołączone jest do wejścia sterującego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością s-GPRS oraz do wyjścia o-GL generatora losowego GL.

Układ bistabilny UB przełącza częstotliwość generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS cyklicznie zmieniając lub synchronizując fazę obydwu generatorów GP i GPRS. Dzięki takiemu sprzężeniu zwrotnemu układ złożony z generatorów pierścieniowych GP i GPRS oraz układu bistabilnego UB może pracować w sposób chaotyczny. Dodatkowo, jeżeli układ bistabilny jest odpowiednio wolny, w procesie detekcji częściej występują zjawiska metastabilnościowe, które poprawiają losowość działania całego układu.

Generator losowy przedstawiony na fig. 2 zawiera dwa generatory pierścieniowe z regulowaną szybkością GPRS i GPRS', których wyjścia o-GPRS i o-GPRS' dołączone są do wejść i1-UB i i2-UB układu bistabilnego UB. Wyjście układu bistabilnego o-UB dołączone jest do wejścia i-US układu sterującego US, a wyjście układu sterującego o-US dołączone jest do wejść sterujących generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością s-GPRS i s-GPRS'. Wyjście o-UB układu bistabilnego UB dołączone jest także do wyjścia o-GL generatora losowego GL.

Opóźnienie wprowadzane przez układ sterujący US do pętli sterowania fazą generatorów powoduje, że układ złożony z generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS', układu bistabilnego UB i układu sterującego US jest układem chaotycznym. Dodatkowo bliskość faz generatorów oznacza czasową bliskość zboczy generowanych sygnałów, które zmieniają swoje czasowe położenie przez występowanie zjawiska jitteru w układach cyfrowych. Dzięki temu pseudolosowy układ chaotyczny staje się układem niedeterministycznym, tym bardziej im wolniejszy jest układ bistabilny, zastosowanie drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS', pracującego przeciwnie w stosunku do pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS, poprawia chaotyczne właściwości działania układu.

Generator losowy przedstawiony na fig. 3 zawiera generator pierścieniowy GP oraz generator pierścieniowy z regulowaną szybkością GPRS, których wyjścia o-GP i o-GPRS dołączone są do wejść i1-DF i i2-DF detektora fazy DF oraz do wejść i1-UM i i2-UM układu metastabilnościowego UM. Wyjście detektora fazy o-DF dołączone jest do wejścia sterującego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością s-GPRS. Wyjście o-UM układu metastabilnościowego UM dołączone jest do pierwszego wyjścia o-GL generatora losowego GL. Drugie wyjście o2-GL generatora losowego GL dołączone jest do wyjścia o-DF detektora fazy DF.

Detektor fazy DF przełącza częstotliwość generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS cyklicznie zmieniając lub synchronizując fazę obydwu generatorów GP i GPRS. Bliskość faz generatorów oznacza czasową bliskość zboczy generowanych sygnałów, które służą do pobudzenia układu metastabilnościowego UM, który wytwarza zjawisko losowe.

Na dwóch wyjściach generatora uzyskuje się dwa niezależne ortogonalne binarne strumienie losowe. Zmienne losowe na wyjściach o-GL i o2-GL generatora losowego GL są niezależne, ponieważ uzyskuje się je w dwóch różnych procesach układowych – jeden w układzie korekcji fazy, drugi w układzie metastabilnościowym. Drugie wyjście o2-GL zapewnia dodatkowo możliwość kontroli procesu korekcji fazy, jak również możliwość kontroli warunków, jakości i parametrów inicjalizacji procesu metastabilnościowego przez układ korekcji fazy.

Generator losowy przedstawiony na fig. 4 zawiera dwa generatory pierścieniowe z regulowaną szybkością GPRS i GPRS', których wyjścia o-GPRS i o-GPRS', dołączone są do wejść i1-DF i i2-DF detektora fazy DF oraz do wejść i1-UM i i2-UM układu metastabilnościowego UM. Wyjście detektora fazy o-DF dołączone jest do wejścia i-US układu sterującego US, a wyjście układu sterującego o-US dołączone jest do wejść sterujących generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością s-GPRS i s-GPRS'. Wyjście o-UM układu metastabilnościowego UM dołączone jest do pierwszego wyjścia o-GL generatora losowego GL. Drugie wyjście o2-GL generatora losowego GL dołączone jest do wyjścia o-DF detektora fazy DF.

Opóźnienie wprowadzane przez układ sterujący US do pętli sterowania fazą generatorów zwiększa zakres przesunięć fazowych, zastosowanie drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS', pracującego przeciwnie w stosunku do pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS, poprawia zbieżność faz generatorów.

Generator losowy przedstawiony na fig. 5 zawiera generator pierścieniowy GP oraz generator pierścieniowy z regulowaną szybkością GPRS, których wyjścia o-GP i o-GPRS dołączone są do wejść i1-DF i i2-DF detektora fazy DF oraz do wejść i1-UM i i2-UM układu metastabilnościowego UM. Wyjście detektora fazy o-DF dołączone jest do głównego wejścia i-US' układu sterującego US', wyjście układu metastabilnościowego o-UM dołączone jest do dodatkowego wejścia układu sterującego r-US', a wyjście układu sterującego o-US' dołączone jest do wejścia sterującego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością s-GPRS. Wyjście o-UM układu metastabilnościowego UM dołączone jest do pierwszego wyjścia o-GL generatora losowego GL. Drugie wyjście o2-GL generatora losowego GL dołączone jest do wyjścia o-DF detektora fazy DF.

Dzięki zastosowaniu dodatkowego wejścia układu sterującego r-US' do układu złożonego z generatorów GP i GPRS, detektora fazy DF i układu sterującego US' może być dodawany sygnał losowy wytwarzany przez układ metastabilnościowy UM.

Generator losowy przedstawiony na fig. 6 zawiera dwa generatory pierścieniowe z regulowaną szybkością GPRS i GPRS', których wyjścia o-GPRS i o-GPRS' dołączone są do wejść i1-DF i i2-DF detektora fazy DF oraz do wejść i1-UM i i2-UM układu metastabilnościowego UM. Wyjście detektora fazy o-DF dołączone jest do głównego wejścia i-US' układu sterującego US', wyjście układu metastabilnościowego o-UM dołączone jest do dodatkowego wejścia układu sterującego r-US', a wyjście układu sterującego o-US' dołączone jest do wejść sterujących generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością s-GPRS i s-GPRS'. Wyjście o-UM układu metastabilnościowego UM dołączone jest do pierwszego wyjścia o-GL generatora losowego GL. Drugie wyjście o2-GL generatora losowego GL dołączone jest do wyjścia o-DF detektora fazy DF.

Zastosowanie drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS', pracującego przeciwnie w stosunku do pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS, poprawia zbieżność faz generatorów.

Generator pierścieniowy przedstawiony na fig. 7 zawiera linię opóźniającą LO, której wejście i-LO i wyjście o-LO są ze sobą połączone i dołączone do wyjścia o-GP generatora pierścieniowego GP. Linia opóźniająca LO zawiera elementy opóźniające EO połączone w szereg.

Liczba elementów opóźniających oraz opóźnienie wprowadzane przez każdy element opóźniający determinują podstawową częstotliwość pracy generatora pierścieniowego GP. Częstotliwość podstawowa jest obciążona niestalością, wynikającą ze zjawisk fizycznych – typowych dla układów elektronicznych (zjawiska szumowe, termiczne, jitter itp.).

Generator pierścieniowy z regulowaną szybkością przedstawiony na fig. 8 zawiera linię opóźniającą LO, której wejście i-LO i wyjście o-LO są ze sobą połączone i dołączone do wyjścia o-GPRS generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS. Linia opóźniająca LO zawiera elementy opóźniające EO połączone w szereg. Pomiędzy wybranymi elementami opóźniającymi EO linia opóźniająca LO ma dołączony element wprowadzający opóźnienie w postaci kondensatora C, który jedną końcówką jest dołączany do tej linii przy pomocy klucza KL. Druga końcówka kondensatora C dołączona jest do masy układu GND. Wejście sterujące klucza KL dołączone jest do wejścia sterującego generatora s-GPRS.

Generator GPRS posiada dwie podstawowe częstotliwości pracy, a wybór jednej z nich dokonywany jest przez sygnał sterujący generatora S-GPRS. Podstawowe częstotliwości pracy zależą od liczby elementów opóźniających EO składających się na linię opóźniającą LO, od opóźnienia wprowadzanego przez każdy element opóźniający EO oraz od opóźnienia wprowadzanego przez dołączenie kondensatora c powodujące wolniejsze przełączanie się sąsiadujących z nim elementów opóźniających

EO. Częstotliwości podstawowe generatora są obarczone niestałością, wynikającą ze zjawisk fizycznych – typowych dla układów elektronicznych (zjawiska szumowe, termiczne, jitter itp.).

Generator pierścieniowy z regulowaną szybkością przedstawiony na fig. 9 ma budowę taką jak układ z fig. 8, z tą różnicą, że klucz KL' ma działanie przeciwne do klucza KL. Odwrotne działanie klucza powoduje, że wybrana częstotliwość pracy generatora GPRS' jest przeciwna w stosunku do częstotliwości wybranej w generatorze GPRS.

Generator pierścieniowy z regulowaną szybkością przedstawiony na fig. 10 zawiera linię opóźniającą LO, której wejście i-LO i wyjście o-LO są ze sobą połączone i dołączone do wyjścia o-GPRS generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS. Linia opóźniająca LO zawiera elementy opóźniające EO połączone w szereg. Pomędzy wybranymi elementami opóźniającymi EO linia opóźniająca LO ma włączony sterowany element opóźniający T, którego wejście sterujące s-T dołączone jest do wejścia sterującego s-GPRS generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS.

Generator GPRS posiada dwie podstawowe częstotliwości pracy, a wybór jednej z nich dokonywany jest przez sygnał sterujący generatora s-GPRS. Podstawowe częstotliwości pracy zależą od liczby elementów opóźniających EO składających się na linię opóźniającą LO, od opóźnienia wprowadzanego przez każdy element opóźniający EO oraz od opóźnienia wprowadzanego przez sterowany element opóźniający T, które wybierane jest przy pomocy sygnału logicznego doprowadzonego do wejścia sterującego S-GPRS generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS, a zatem i do wejścia sterującego s-T sterowanego elementu opóźniającego T.

Liczba elementów opóźniających EO w liniach opóźniających LO pary generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS determinuje częstość korekcji fazy przez detektor fazy dołączony do wyjść tych generatorów. Natomiast różnica opóźnień wprowadzanych przez sterowany element opóźniający T determinuje zakres wielkości różnicy faz pary generatorów. Dodatkowo częstotliwości podstawowe generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS są obarczone niestałością, wynikającą ze zjawisk fizycznych – typowych dla układów elektronicznych (zjawiska szumowe, termiczne, jitter itp.).

Sterowany element opóźniający przedstawiony na fig. 11 zawiera dwa tranzystory polowe o przeciwnym typie przewodnictwa P, N. Źródła tranzystorów są ze sobą połączone i dołączone do wejścia i-T sterowanego elementu opóźniającego T, dreny tranzystorów są ze sobą połączone i dołączone do wyjścia o-T sterowanego elementu opóźniającego T, natomiast bramki tranzystorów są ze sobą połączone i dołączone do wejścia sterującego s-T sterowanego elementu opóźniającego T.

Symetryczność budowy tranzystora polowego pozwala na zamianę miejscami jego końcówek, drenu i źródła. Przeciwny typ przewodnictwa tranzystorów, sterowanych tym samym sygnałem logicznym dołączonym do bramek obydwu tranzystorów, powoduje że zero logiczne wyłącza jeden tranzystor N i włącza drugi P, podczas gdy jedynka logiczna czyni odwrotnie. Przy identycznej geometrii tranzystorów, jeden z nich P wprowadza nieco większe opóźnienie pomiędzy wejściem i-T a wyjściem o-T sterowanego elementu opóźniającego T, zmiana geometrii kanałów tranzystorów, w szczególności istotne wydłużenie jednego z kanałów, wprowadza silnie asymetryczną pracę tranzystorów pod względem wprowadzanego opóźnienia. Odwrócenie długości kanałów w innej parze tranzystorów, zawartych w innym sterowanym elemencie opóźniającym, włączonym w szereg elementów opóźniających innego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością, zapewnia komplementarne sterowanie parą takich generatorów, w których ten sam sygnał sterujący wywołuje przeciwny skutek w każdym z nich.

Sterowany element opóźniający przedstawiony na fig. 12 ma budowę taką jak układ z fig. 11, z tą różnicą, że w szereg z jednym tranzystorem P, to znaczy pomiędzy tym tranzystorem P, a wyjściem o-T sterowanego elementu opóźniającego T, włączone zostały szeregowo dwa elementy opóźniające EO.

Włączenie dodatkowych elementów opóźniających EO zapewnia dodatkowe opóźnienie pomiędzy wejściem i-T a wyjściem o-T sterowanego elementu opóźniającego T jedynie dla jednego stanu logicznego sygnału sterującego s-T. Takie same elementy opóźniające włączone w szereg z drugim tranzystorem w innej parze tranzystorów, zawartych w innym sterowanym elemencie opóźniającym, włączonym w szereg elementów opóźniających innego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością, zapewniają komplementarne sterowanie parą takich generatorów, w których ten sam sygnał sterujący wywołuje przeciwny skutek w każdym z nich.

Sterowany element opóźniający przedstawiony na fig. 13 ma budowę taką jak układ z fig. 11, z tą różnicą, że pomiędzy bramki tranzystorów polowych P i N a wejście sterujące s-T sterowanego elementu opóźniającego T włączony został inwerter Inv.

Zastosowanie inwertera Inv w tylko jednym z dwóch sterowanych elementów opóźniających, posiadających identyczną budowę wewnętrzną, włączonych w szereg elementów opóźniających linii opóźniających dwóch generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością, zapewnia komplementarne sterowanie parą takich generatorów, w których ten sam sygnał sterujący wywołuje przeciwny skutek w każdym z nich.

Generator pierścieniowy z przełączaną ścieżką propagacji przedstawiony na fig. 14 zawiera dwie linie opóźniające LO1 i LO2 oraz multiplexer MUX. Linie opóźniające LO1 i LO2 połączone ze sobą w szereg tak, że wyjście pierwszej linii opóźniającej o-LO1 dołączone jest do wejścia drugiej linii opóźniającej i-LO2. Wyjście drugiej linii o-LO2 dołączone jest do wyjścia o-GPSP generatora pierścieniowego z przełączaną ścieżką propagacji GPSP. Każda z linii opóźniających LO1 i LO2 zawiera elementy opóźniające EO połączone w szeregi. Multiplexer MUX ma dwa wejścia i0-MUX i i1-MUX, które dołączone są do wyjść linii opóźniających o-LO1 i o-LO2. Wyjście multiplexera o-MUX dołączone jest do wejścia pierwszej linii opóźniającej i-LO1. Wejście sterujące multiplexera s-MUX dołączone jest do wejścia sterującego generatora s-GPSP.

Generator GPSP posiada dwie podstawowe częstotliwości pracy, a wybór jednej z nich dokonywany jest przez sygnał sterujący generatora s-GPSP. Podstawowe częstotliwości pracy zależą od liczby elementów opóźniających EO składających się na każdą z linii opóźniających LO1 i LO2, od opóźnień wprowadzanych przez każdy element opóźniający EO oraz od opóźnienia wprowadzanego przez multiplexer MUX. Częstotliwości podstawowe są obciążone niestałością, wynikającą ze zjawisk fizycznych – typowych dla układów elektronicznych (zjawiska szumowe, termiczne, jitter itp.).

Generator pierścieniowy z przełączaną ścieżką propagacji przedstawiony na fig. 15 ma budowę taką jak układ z fig. 14, z tą różnicą, że wejścia i0-MUX i i1-MUX multiplexera MUX są dołączone do wyjść linii opóźniających o-LO1 i o-LO2 na odwrót. Odwrotne dołączenie wyjść linii opóźniających do wejść multiplexera powoduje, że wybrana częstotliwość pracy generatora GPSP' jest przeciwna w stosunku do częstotliwości wybranej w generatorze GPSP.

Generator losowy przedstawiony na fig. 16 zawiera dwa generatory pierścieniowe z regulowaną szybkością GPRS i GPRS', detektor fazy DF, układ sterujący US' oraz siedem układów metastabilnościowych UM1, UM2, UM3, UM4, UM5, UM6 i UM7. Generatory pierścieniowe z regulowaną szybkością GPRS i GPRS' zawierają linie opóźniające LO i LO' zamknięte w pętli tak, że wyjście o-LO i o-LO' linii opóźniającej LO i LO' dołączone jest do wejścia i-LO i i-LO' tej linii i jednocześnie wyjścia linii opóźniających LO i LO' dołączone są do wyjść o-GPRS i o-GPRS' generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS'. Linie opóźniające LO i LO' składają się z elementów opóźniających EO połączonych w szeregi włączone pomiędzy wejściami i-LO i i-LO' i wyjściami o-LO i o-LO' tych linii. Pomiedzy trzecim i czwartym elementem opóźniającym EO, licząc od początku linii opóźniających LO i LO', linie opóźniające LO i LO' mają dołączone elementy wprowadzające opóźnienie w postaci kondensatorów, które jedną końcówką są dołączone do tych linii przy pomocy kluczy K i K', a drugą końcówką dołączone są do masy układu GND. W ten sposób do linii dołączany jest sterowany element wprowadzający opóźnienie C. Wejścia sterujące kluczy K i K' dołączone są do wejść sterujących s-GPRS i s-GPRS' generatorów z regulowaną szybkością GPRS i GPRS', a klucze K i K' pracują przeciwsobnie. Do wyjść o-GPRS i o-GPRS' generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS' dołączone są wejścia i1-DF i i2-DF detektora fazy DF, którego wyjście o-DF dołączone jest do głównego wejścia i-US' układu sterującego US', którego wyjście o-US' dołączone jest do wejść sterujących s-GPRS i s-GPRS' generatorów z regulowaną szybkością GPRS i GPRS'. Wyjścia o-UM1, o-UM2, o-UM3, o-UM4, o-UM5, o-UM6 i o-UM7 układów metastabilnościowych UM1, UM2, UM3, UM4, UM5, UM6 i UM7 dołączone są do wyjść o1-GL, o2-GL, o3-GL, o4-GL, o5-GL, o6-GL i o7-GL generatora losowego GL, przy czym wyjście o-UM1 pierwszego z układów metastabilnościowych UM1 dołączone jest również do dodatkowego wejścia r-US' układu sterującego US'. Pierwsze wejście i1-UM1 pierwszego układu metastabilnościowego UM1 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia ostatniego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM1 pierwszego układu metastabilnościowego UM1 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia ostatniego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM2 drugiego układu metastabilnościowego UM2 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia pierwszego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM2

drugiego układu metastabilnościowego UM2 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia pierwszego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM3 trzeciego układu metastabilnościowego UM3 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia drugiego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM3 trzeciego układu metastabilnościowego UM3 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia drugiego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM4 czwartego układu metastabilnościowego UM4 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia czwartego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM4 czwartego układu metastabilnościowego UM4 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia piątego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM5 piątego układu metastabilnościowego UM5 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia piątego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM5 piątego układu metastabilnościowego UM5 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia siódmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM6 szóstego układu metastabilnościowego UM6 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia ósmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM6 szóstego układu metastabilnościowego UM6 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia ósmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM7 siódmego układu metastabilnościowego UM7 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia ósmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM7 siódmego układu metastabilnościowego UM7 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia ósmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej.

Pierwsze trzy układy metastabilnościowe UM1, UM2 i UM3 dołączone są do linii opóźniających w taki sposób, aby nie obciążać zanadto elementów opóźniających EO i jednocześnie aby były pobudzane podobnymi sygnałami – to znaczy podobnymi przesunięciami fazy sygnałów w generatorach pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS'. Trzeci, czwarty i piąty układ metastabilnościowy UM3, UM4 i UM5 jest również dołączony do linii opóźniających w taki sposób, aby nie obciążać zanadto elementów opóźniających EO, jednak każdy z tych układów metastabilnościowych jest pobudzany zupełnie innym przesunięciem fazowym sygnałów w generatorach pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS'. Szósty układ metastabilnościowy UM6 pobudzany jest tymi samymi sygnałami co siódmy układ metastabilnościowy UM7. Identyczna budowa tych dwóch układów metastabilnościowych UM6 i UM7 zapewnia zbliżone warunki ich pobudzania, natomiast różna ich budowa – w szczególności symetryczna względem siebie przy niesymetrycznej charakterystyce działania – zapewnia pobudzenie tych układów przy różnych przesunięciach fazowych.

Generatory pierścieniowe z regulowaną szybkością GPRS i GPRS' posiadają dwie podstawowe częstotliwości pracy, a wybór jednej z nich dokonywany jest przez sygnał sterujący generatorów s-GPRS i s-GPRS'. Podstawowe częstotliwości pracy zależą od liczby elementów opóźniających EO składających się na linii opóźniającej LO i LO', od opóźnienia wprowadzanego przez każdy element opóźniający EO oraz od opóźnienia wprowadzanego przez dołączenie kondensatora C powodujące wolniejsze przełączanie się sąsiadujących z nim elementów opóźniających EO. Częstotliwości podstawowe generatora są obciążone niestałością, wynikającą ze zjawisk fizycznych – typowych dla układów elektronicznych (zjawiska szumowe, termiczne, jitter itp.) – dzięki czemu faza sygnałów również podlega zmianom losowym.

Detektor fazy DF przełącza częstotliwości generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS' cyklicznie zmieniając lub synchronizując fazę obydwu generatorów. Bliskość faz generatorów oznacza czasową bliskość zboczy generowanych sygnałów, które służą do pobudzenia układów metastabilnościowych, które wytwarzają niezależne zjawiska losowe. Wyjątkiem są układy metastabilnościowe dołączane do linii opóźniających z pewnym przesunięciem, gdyż w nich zależy właśnie

na innym pobudzeniu fazowym – przesuniętych o czas lub wielokrotność czasu propagacji elementu opóźniającego EO.

Generator losowy przedstawiony na fig. 17 zawiera dwa generatory pierścieniowe z regulowaną szybkością GPRS i GPRS', detektor fazy DF, układ sterujący US' oraz siedem układów metastabilnościowych UM1, UM2, UM3, UM4, UM5, UM6 i UM7. Generatory pierścieniowe z regulowaną szybkością GPRS i GPRS' zawierają linie opóźniające LO i LO' zamknięte w pętli tak, że wyjście o-LO i o-LO' linii opóźniającej LO i LO' dołączone jest do wejścia i-LO i i-LO' tej linii i jednocześnie wyjścia linii opóźniających LO i LO' dołączone są do wyjść o-GPRS i o-GPRS' generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS'. Linie opóźniające LO i LO' składają się z elementów opóźniających EO połączonych w szeregi włączone pomiędzy wejściami i-LO i i-LO' i wyjściami o-LO i o-LO' tych linii. Pomiedzy trzecim i czwartym elementem opóźniającym EO, licząc od początku linii opóźniających LO i LO', linie opóźniające LO i LO' mają włączone sterowane elementy opóźniające T i T', których wejścia sterujące s-T i s-T' dołączone są do wejść sterujących s-GPRS i s-GPRS' generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS'. Do wyjść o-GPRS i o-GPRS' generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS' dołączone są wejścia i1-DF i i2-DF detektora fazy DF, którego wyjście o-DF dołączone jest do głównego wejścia i-US' układu sterującego US', którego wyjście o-US' dołączone jest do wejść sterujących s-GPRS i s-GPRS' generatorów z regulowaną szybkością GPRS i GPRS'. Wyjścia o-UM1, o-UM2, o-UM3, o-UM4, o-UM5, o-UM6 i o-UM7 układów metastabilnościowych UM1, UM2, UM3, UM4, UM5, UM6 i UM7 dołączone są do wyjść o1-GL, o2-GL, o3-GL, o4-GL, o5-GL, o6-GL i o7-GL generatora losowego GL, przy czym wyjście o-UM1 pierwszego z układów metastabilnościowych UM1 dołączone jest również do dodatkowego wejścia r-US' układu sterującego US'. Pierwsze wejście i1-UM1 pierwszego układu metastabilnościowego UM1 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia ostatniego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM1 pierwszego układu metastabilnościowego UM1 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia ostatniego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM2 drugiego układu metastabilnościowego UM2 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia pierwszego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM2 drugiego układu metastabilnościowego UM2 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia pierwszego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM3 trzeciego układu metastabilnościowego UM3 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia drugiego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM3 trzeciego układu metastabilnościowego UM3 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia drugiego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM4 czwartego układu metastabilnościowego UM4 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia czwartego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM4 czwartego układu metastabilnościowego UM4 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia piątego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM5 piątego układu metastabilnościowego UM5 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia piątego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM5 piątego układu metastabilnościowego UM5 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia siódmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM6 szóstego układu metastabilnościowego UM6 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia ósmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM6 szóstego układu metastabilnościowego UM6 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia ósmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM7 siódmego układu metastabilnościowego UM7 dołączone jest do linii opóźniającej LO pierwszego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS do wyjścia ósmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście

i2-UM7 siódmego układu metastabilnościowego UM7 dołączone jest do linii opóźniającej LO' drugiego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością GPRS' do wyjścia ósmego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej.

Pierwsze trzy układy metastabilnościowe UM1, UM2 i UM3 dołączone są do linii opóźniających w taki sposób, aby nie obciążać zanadto elementów opóźniających EO i jednocześnie aby były pobudzane podobnymi sygnałami – to znaczy podobnymi przesunięciami fazy sygnałów w generatorach pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS'. Trzeci, czwarty i piąty układ metastabilnościowy UM3, UM4 i UM5 jest również dołączony do linii opóźniających w taki sposób, aby nie obciążać zanadto elementów opóźniających EO, jednak każdy z tych układów metastabilnościowych jest pobudzany zupełnie innym przesunięciem fazowym sygnałów w generatorach pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS'. Szósty układ metastabilnościowy UM6 pobudzany jest tymi samymi sygnałami co siódmy układ metastabilnościowy UM7. Identyczna budowa tych dwóch układów metastabilnościowych UM6 i UM7 zapewnia zbliżone warunki ich pobudzania, natomiast różna ich budowa – w szczególności symetryczna względem siebie przy niesymetrycznej charakterystyce działania – zapewnia pobudzenie tych układów przy różnych przesunięciach fazowych.

Generatory pierścieniowe z regulowaną szybkością GPRS i GPRS' posiadają dwie podstawowe częstotliwości pracy, a wybór jednej z nich dokonywany jest przez sygnał sterujący generatorów s-GPRS i s-GPRS'. Podstawowe częstotliwości pracy zależą od liczby elementów opóźniających EO składających się na linii opóźniającej LO i LO', od opóźnienia wprowadzanego przez każdy element opóźniający EO oraz od opóźnień wprowadzanych przez sterowane elementy opóźniające T i T', które wybierane są przy pomocy sygnału logicznego doprowadzonego do wejść sterujących S-GPRS i s-GPRS' generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością, a zatem i do wejść sterujących s-T i s-T' sterowanych elementów opóźniających. Częstotliwości podstawowe generatora są obciążone niestalością, wynikającą ze zjawisk fizycznych – typowych dla układów elektronicznych (zjawiska szumowe, termiczne, jitter itp.) – dzięki czemu faza sygnałów również podlega zmianom losowym.

Detektor fazy DF przełącza częstotliwości generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością GPRS i GPRS' cyklicznie zmieniając lub synchronizując fazę obydwu generatorów. Bliskość faz generatorów oznacza czasową bliskość zboczy generowanych sygnałów, które służą do pobudzenia układów metastabilnościowych, które wytwarzają niezależne zjawiska losowe. Wyjątkiem są układy metastabilnościowe dołączane do linii opóźniających z pewnym przesunięciem, gdyż w nich zależy właśnie na innym pobudzeniu fazowym – przesuniętym o czas lub wielokrotność czasu propagacji elementu opóźniającego EO.

Generator losowy przedstawiony na fig. 18 zawiera dwa generatory pierścieniowe z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP', detektor fazy DF, układ sterujący US' oraz siedem układów metastabilnościowych UM1, UM2, UM3, UM4, UM5, UM6 i UM7. Generatory pierścieniowe z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP' zawierają po dwie linie opóźniające LO1 i LO2 oraz LO1' i LO2' zamknięte w pętle tak, że wyjście o-LO1 i LO1' pierwszej linii opóźniającej LO1 i LO1' dołączone jest do wejścia i-LO2 i i-LO2' drugiej linii, a wyjście o-LO2 i o-LO2' drugiej linii opóźniającej LO2 i LO2' dołączone jest do wejścia i-LO1 i i-LO1' pierwszej linii, a także do wyjścia o-GPSP i o-GPSP' generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP'. Linie opóźniające LO1, LO2, LO1' i LO2' składają się z elementów opóźniających EO połączonych w szeregi włączone pomiędzy wejściami i-LO1, i-LO2, i-LO1' i i-LO2' i wyjściami o-LO1, o-LO2, o-LO1' i o-LO2' tych linii. Generatory pierścieniowe z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP' zawierają multipleksery MUX i MUX', których wejścia i0-MUX i i1-MUX oraz i0-MUX' i i1-MUX' dołączone są do wyjść obydwu linii opóźniających o-LO1 i o-LO2 oraz o-LO2' i o-LO1', przeciwnie w każdym multiplekserze, a wyjścia multiplekserów o-MUX i o-MUX' dołączone są do wejść pierwszych linii opóźniających i-LO1 i i-LO1'. Wejścia sterujące multiplekserów s-MUX i s-MUX' dołączone są do wejść sterujących s-GPSP i s-GPSP' generatorów z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP'. Do wyjść o-GPSP i o-GPSP' generatorów pierścieniowych z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP' dołączone są wejścia i1-DF i i2-DF detektora fazy DF, którego wyjście o-DF dołączone jest do głównego wejścia i-US' układu sterującego US', którego wyjście o-US' dołączone jest do wejść sterujących s-GPSP i s-GPSP' generatorów z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP'. Wyjścia o-UM1, o-UM2, o-UM3, o-UM4, o-UM5, o-UM6 i o-UM7 układów metastabilnościowych UM1, UM2, UM3, UM4, UM5, UM6 i UM7 dołączone są do wyjść o1-GL, o2-GL, o3-GL, o4-GL, o5-GL, o6-GL i o7-GL generatora losowego GL, przy czym wyjście o-UM1 pierwszego z układów metastabilnościowych UM1 dołączone jest również do do-

datkowego wejścia r-US' układu sterującego US'. Pierwsze wejście i1-UM1 pierwszego układu metastabilnościowego UM1 dołączone jest do drugiej linii opóźniającej LO2 pierwszego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP do wyjścia ostatniego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM1 pierwszego układu metastabilnościowego UM1 dołączone jest do drugiej linii opóźniającej LO2' drugiego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP' do wyjścia ostatniego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM2 drugiego układu metastabilnościowego UM2 dołączone jest do pierwszej linii opóźniającej LO1 pierwszego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP do wyjścia pierwszego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM2 drugiego układu metastabilnościowego UM2 dołączone jest do pierwszej linii opóźniającej LO1' drugiego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP' do wyjścia pierwszego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM3 trzeciego układu metastabilnościowego UM3 dołączone jest do pierwszej linii opóźniającej LO1 pierwszego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP do wyjścia drugiego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM3 trzeciego układu metastabilnościowego UM3 dołączone jest do pierwszej linii opóźniającej LO1' drugiego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP' do wyjścia drugiego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM4 czwartego układu metastabilnościowego UM4 dołączone jest do pierwszej linii opóźniającej LO1 pierwszego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP do wyjścia czwartego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM4 czwartego układu metastabilnościowego UM4 dołączone jest do pierwszej linii opóźniającej LO1' drugiego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP' do wyjścia piątego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM5 piątego układu metastabilnościowego UM5 dołączone jest do pierwszej linii opóźniającej LO1 pierwszego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP do wyjścia piątego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM5 piątego układu metastabilnościowego UM5 dołączone jest do drugiej linii opóźniającej LO2' drugiego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP' do wyjścia drugiego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM6 szóstego układu metastabilnościowego UM6 dołączone jest do drugiej linii opóźniającej LO2 pierwszego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP do wyjścia trzeciego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM6 szóstego układu metastabilnościowego UM6 dołączone jest do drugiej linii opóźniającej LO2' drugiego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP' do wyjścia trzeciego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Pierwsze wejście i1-UM7 siódmego układu metastabilnościowego UM7 dołączone jest do drugiej linii opóźniającej LO2 pierwszego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP do wyjścia trzeciego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej. Drugie wejście i2-UM7 siódmego układu metastabilnościowego UM7 dołączone jest do drugiej linii opóźniającej LO2' drugiego generatora pierścieniowego z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP' do wyjścia trzeciego elementu opóźniającego EO licząc od początku tej linii opóźniającej.

Pierwsze trzy układy metastabilnościowe UM1, UM2 i UM3 dołączone są do linii opóźniających w taki sposób, aby nie obciążać za bardzo elementów opóźniających EO i jednocześnie aby były pobudzane podobnymi sygnałami – to znaczy podobnymi przesunięciami fazy sygnałów w generatorach pierścieniowych z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP'. Trzeci, czwarty i piąty układ metastabilnościowy UM3, UM4 i UM5 jest również dołączony do linii opóźniających w taki sposób, aby nie obciążać za bardzo elementów opóźniających EO, jednak każdy z tych układów metastabilnościowych jest pobudzany zupełnie innym przesunięciem fazowym sygnałów w generatorach pierścieniowych z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP'. Szósty układ metastabilnościowy UM6 pobudzany jest tymi samymi sygnałami co siódmy układ metastabilnościowy UM7. Identyczna budowa tych dwóch układów metastabilnościowych UM6 i UM7 zapewnia zbliżone warunki ich pobudzania, natomiast różna ich budowa – w szczególności symetryczna względem siebie przy niesymetrycznej charakterystyce działania – zapewnia pobudzenie tych układów przy różnych przesunięciach fazowych.

Generatory pierścieniowe z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP' posiadają dwie podstawowe częstotliwości pracy, a wybór jednej z nich dokonywany jest przez sygnał sterujący gene-

ratorów s-GPSP i s-GPSP'. Podstawowe częstotliwości pracy zależą od liczby elementów opóźniających EO składających się na każdą z linii opóźniających LO1 i LO2 oraz LO1' i LO2', od opóźnienia wprowadzanego przez każdy element opóźniający EO oraz od opóźnienia wprowadzanego przez multiplexer MUX. Częstotliwości podstawowe generatora są obciążone niestałością, wynikającą ze zjawisk fizycznych – typowych dla układów elektronicznych (zjawiska szumowe, termiczne, jitter itp.) – dzięki czemu faza sygnałów również podlega zmianom losowym.

Detektor fazy DF przełącza częstotliwości generatorów pierścieniowych z przełączanymi ścieżkami propagacji GPSP i GPSP' cyklicznie zmieniając lub synchronizując fazę obydwu generatorów. Bliskość faz generatorów oznacza czasową bliskość zboczy generowanych sygnałów, które służą do pobudzenia układów metastabilnościowych, które wytwarzają niezależne zjawiska losowe. Wyjątkiem są układy metastabilnościowe dołączane do linii opóźniających z pewnym przesunięciem, gdyż w nich zależy właśnie na innym pobudzeniu fazowym – przesuniętym o czas lub wielokrotność czasu propagacji elementu opóźniającego EO.

Układ sterujący przedstawiony na fig. 19 zawiera dwuelementowy szereg złożony z elementów opóźniających EO dołączony pomiędzy wejściem i-US i wyjściem o-US układu sterującego US.

Szereg elementów opóźniających EO wprowadza opóźnienie w sprzężeniu zwrotnym, tj. opóźnienie w przekazywaniu sygnału sterowania korekcją fazy, dzięki czemu zwiększa zakres przesunięć fazowych.

Układ sterujący przedstawiony na fig. 20 stanowi bramka dodawania losowości XOR', której pierwsze wejście stanowi wejście danych losowych r-US' układu sterującego US', drugie wejście bramki stanowi wejście sygnałowe układu sterującego i-US', a wyjście bramki stanowi wyjście układu sterującego o-US'.

Bramka XOR' wprowadza opóźnienie dla sygnału przekazywanego pomiędzy wejściem i-US' i wyjściem o-US' oraz dodaje do tego sygnału wartość losową dostarczaną do wejścia danych losowych układu sterującego r-US'.

Układ sterujący przedstawiony na fig. 21 ma budowę taką jak układ z fig. 20, w którym pierwsze wejście bramki dodawania losowości XOR' dołączone jest do wejścia danych losowych układu sterującego r-US' przez układ bramkujący AND' oraz do układu bramkującego AND' dołączony jest układ sterowania bramkowaniem LCZ'.

Układ bramkujący AND' wraz z układem sterowania bramkowaniem LCZ' dopuszczają jedynie wybrane wartości losowe dostarczane do wejścia danych losowych układu sterującego r-US'. Na przykład układ sterowania bramkowaniem LCZ' może być wykonany w postaci licznika, który będzie dopuszczał jedynie co którąś wartość losową.

Układ sterujący przedstawiony na fig. 22 ma budowę taką jak układ z fig. 21, w którym wyjście bramki dodawania losowości XOR' dołączone jest do wyjścia układu sterującego o-US' przez dwuelementowy szereg złożony z elementów opóźniających EO.

Szereg elementów opóźniających EO wraz z bramką dodawania losowości XOR' wprowadzają dodatkowe opóźnienie dla sygnału przekazywanego pomiędzy wejściem i-US' i wyjściem o-US' układu sterującego. Opóźnienie to wpływa na charakterystykę korekcji fazy w układzie. Miejsce dołączenia bramki dodawania losowości XOR' względem elementów opóźniających EO, będące miejscem w szeregu elementów pomiędzy wejściem sygnałowym i-US', a wyjściem układu sterującego o-US', wpływa na moment wprowadzenia losowości do układu korekcji fazy.

Układ sterujący przedstawiony na fig. 23 jest połączeniem układów sterujących z fig. 21 oraz fig. 22, za wyjątkiem miejsca dołączenia bramki dodawania losowości XOR' względem elementów opóźniających EO, która w tym układzie znajduje się pomiędzy elementami opóźniającymi.

Detektor fazy przedstawiony na fig. 24 stanowi przerzutnik P o dwóch wejściach D i C stanowiących wejścia i1-DF i i2-DF detektora fazy DF i wyjściu Q stanowiącym wyjście detektora fazy o-DF.

W zależności od tego, czy narastające zbocze na wejściu D przerzutnika nadejdzie przed czy po narastającym zboczem na wejściu C przerzutnika, na wyjściu Q pojawi się logiczna jedynka lub logiczne zero. Rodzaj przerzutnika – np. przerzutnik typu „D”, przerzutnik „RS”, przerzutnik „JK” itp. – ma drugorzędne znaczenie dopóki przerzutnik wykrywa pierwszeństwo zboczy sygnałów wejściowych.

Detektor fazy przedstawiony na fig. 25 zawiera układ logiczny AND o dwóch wejściach i jednym wyjściu oraz dwa przerzutniki P1 i P2, każdy o dwóch wejściach D1 i C1 oraz D2 i C2 jak również dwóch wyjściach Q1 i nQ1 oraz Q2 i nQ2. Wejścia przerzutników dołączone są do wejść detektora fazy DF, natomiast wyjścia przerzutników dołączone do wyjść detektora fazy przez układ logiczny AND. Pierwsze

wejście detektora fazy i1-DF dołączone jest jednocześnie do pierwszego wejścia pierwszego przerzutnika D1 i drugiego wejścia drugiego przerzutnika C2. Drugie wejście detektora fazy i2-DF dołączone jest jednocześnie do drugiego wejścia pierwszego przerzutnika C1 i pierwszego wejścia drugiego przerzutnika D2. Wejścia układu logicznego AND dołączone są do drugiego wyjścia pierwszego przerzutnika nQ1 oraz pierwszego wyjścia drugiego przerzutnika Q2. Wyjście układu logicznego AND dołączone jest do wyjścia detektora fazy o-DF.

Detektor fazy zbudowany z dwóch przerzutników pozwala na symetryczną detekcję ujemnych i dodatnich przesunięć fazowych.

Układ metastabilnościowy przedstawiony na fig. 26 stanowi przerzutnik Pa o dwóch wejściach Da i Ca stanowiących wejścia i1-UM i i2-UM układu metastabilnościowego UM i wyjściu Qa stanowiącym wyjście układu metastabilnościowego o-UM.

Przerzutnik Pa jest charakteryzuje się tym, że względne nieduże przesunięcia czasu pomiędzy zboczami dostarczonymi do wejść przerzutnika Da i Ca wprowadzają go w pracę w odpowiednim obszarze metastabilności, czego skutkiem jest losowy stan logiczny na wyjściu Qa. Rodzaj przerzutnika – np. przerzutnik typu „D”, przerzutnik „RS”, przerzutnik „JK” itp. – ma drugorzędne znaczenie dopóki przerzutnik zapewnia losową odpowiedź na swoim wyjściu w przypadku odpowiedniej bliskości zboczy sygnałów wejściowych.

Układ metastabilnościowy przedstawiony na fig. 27 stanowi układ metastabilnościowy z oscylacyjną odpowiedzią impulsową UMOO o dwóch wejściach R i S stanowiących wejścia i1-UM i i2-UM układu metastabilnościowego UM i wyjściu wOO stanowiącym wyjście układu metastabilnościowego o-UM.

Przerzutnik UMOO charakteryzuje się tym, że względne nieduże przesunięcia czasu pomiędzy zboczami dostarczonymi do wejść przerzutnika R i S wprowadzają go w pracę w odpowiednim obszarze metastabilności, czego skutkiem jest oscylacyjna odpowiedź przerzutnika o zmiennej liczbie oscylacji, a także losowym stanie logicznym na wyjściu wOO.

Układ metastabilnościowy przedstawiony na fig. 28 ma budowę taką jak układ z fig. 27, przy czym wyjście wOO układu metastabilnościowego z oscylacyjną odpowiedzią impulsową UMOO dołączone jest do wyjścia układu metastabilnościowego o-UM przez sumator SUM.

Sumator SUM pozwala na zsumowanie zmiennej liczby oscylacji pojawiającej się na wyjściu wOO.

Układ metastabilnościowy przedstawiony na fig. 29 ma budowę taką jak układ z fig. 28, przy czym dodatkowo zawiera układ liczący LCZ, którego wyjścia dołączone są do kolejnych wejść sumatora SUM oraz którego wejście i-LCZ dołączone jest do wyjścia układu metastabilnościowego z oscylacyjną odpowiedzią impulsową wOO.

Licznik LCZ zlicza liczbę oscylacji pojawiającą się na wyjściu wOO, którą następnie sumuje sumator SUM. Dodatkowo w tym układzie uwzględniany jest stan logiczny na wyjściu wOO.

Układ metastabilnościowy przedstawiony na fig. 30 zawiera generator metastabilnościowych interwałów czasowych GMIC, arbiter ARB oraz układ logiczny AND. Generator metastabilnościowych interwałów czasowych GMIC zawiera dwa przerzutniki Pb i Pc, każdy o dwóch wejściach Db i Cb oraz Dc i Cc jak również pojedynczych wyjściach Qb i Qc. Arbiter ARB zawiera dwa przerzutniki Pd i Pe, każdy o dwóch wejściach Dd i Cd oraz De i Ce jak również dwóch wyjściach Qd i nQd oraz Qe i nQe. Układ logiczny AND posiada dwa wejścia i jedno wyjście. Wejścia przerzutników generatora metastabilnościowych interwałów czasowych GMIC dołączone są do wejść układu metastabilnościowego UM w taki sposób, że pierwsze wejście układu metastabilnościowego i1-UM dołączone jest jednocześnie do pierwszego wejścia pierwszego przerzutnika Db i pierwszego wejścia drugiego przerzutnika Dc, a drugie wejście układu metastabilnościowego i2-UM dołączone jest jednocześnie do drugiego wejścia pierwszego przerzutnika Cb i drugiego wejścia drugiego przerzutnika Cc. Wyjścia przerzutników Qb i Qc dołączone są do wejść przerzutników arbitra ARB w taki sposób, że wyjście pierwszego przerzutnika Qb dołączone jest jednocześnie do pierwszego wejścia pierwszego przerzutnika arbitra Dd i drugiego wejścia drugiego przerzutnika arbitra Ce, a wyjście drugiego przerzutnika Qc dołączone jest jednocześnie do drugiego wejścia pierwszego przerzutnika arbitra Cd i pierwszego wejścia drugiego przerzutnika arbitra De. Wyjście układu metastabilnościowego o-UM dołączone jest do wyjść przerzutników arbitra nQd i Qe przez układ logiczny AND. Wejścia układu logicznego AND dołączone są do drugiego wyjścia pierwszego przerzutnika arbitra nQd oraz pierwszego wyjścia drugiego przerzutnika arbitra Qe. Wyjście układu logicznego AND dołączone jest do wyjścia układu metastabilnościowego o-UM.

Dostarczenie do przelutników Pb i Pc generatora metastabilnościowych interwałów czasowych GMIC sygnałów cyfrowych o względnie niedużych przesunięciach czasu pomiędzy zboczami dostarczonymi do wejść przelutników, wywołuje w nich stany metastabilne, których rozwiązaniem są wartości logiczne pojawiające się na wyjściach Qb i Qc w różnych momentach czasu, zarówno wartości logiczne jak i interwały czasowe są źródłami losowości o określonych właściwościach tych losowości. Arbiter porównuje czasy odpowiedzi przelutników Pb i Pc, a wynik tego porównania – który jest wartością losową – jest interpretowany przez układ logiczny AND jako logiczne zero lub logiczna jedynka.

Możliwości zastosowania wynalazku przewiduje się w generowaniu liczb i ciągów liczbowych prawdziwie losowych.

Unikalną wartością dodaną wynikającą z zastosowania wynalazku jest to, że może zostać zaimplementowany w czysto cyfrowych układach programowanych. Dzięki temu, że zmienną w sprzężeniu zwrotnym układu cyfrowego jest nie tylko wartość logiczna, lecz także czas, układ wykazuje cechy właściwe analogowym układom chaotycznym. W ten sposób w deterministycznym układzie cyfrowym uzyskuje się prawdziwie chaotyczne analogowe i ciągle zmienne, co przeczy powszechnej wiedzy znawców.

### Zastrzeżenia patentowe

1. Generator losowy (GL) zawierający układ bistabilny (UB), którego wyjście (o-UB) jest dołączone do wyjścia (o-GL) generatora losowego (GL) oraz zawierający przynajmniej dwa generatory pierścieniowe (GP), które są podłączone do wejść (i1-UB, i2-UB) układu bistabilnego (UB), **znamienny tym**, że przynajmniej jeden generator pierścieniowy jest generatorem pierścieniowym z regulowaną szybkością (GPRS, GPRS'), oraz tym że wyjście (o-UB) przynajmniej jednego układu bistabilnego (UB), którego wejścia (i1-UB, i2-UB) są połączone z generatorami pierścieniowymi (GP, GPRS, GPRS') jest dołączone do przynajmniej jednego wejścia sterującego (s-GPRS, s-GPRS') generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością (GPRS, GPRS'), przy czym generator losowy (GL) posiada drugi układ bistabilny, którego pierwsze wejście jest dołączone do jednego generatora pierścieniowego (GPRS), drugie wejście jest dołączone do innego generatora pierścieniowego (GP, GPRS'), a wyjście jest dołączone do drugiego wyjścia generatora losowego (GL).
2. Generator losowy według zastrz. 1, **znamienny tym**, że przynajmniej jedno wyjście (o-UB) przynajmniej jednego układu bistabilnego (UB) dołączone jest do przynajmniej jednego wejścia sterującego (s-GPRS, s-GPRS') generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością (GPRS, GPRS') przez układ sterujący (US).
3. Generator losowy według zastrz. 1, **znamienny tym**, że przynajmniej jedno wyjście (o-UB) przynajmniej jednego układu bistabilnego (UB) dołączone jest do przynajmniej jednego wejścia sterującego (s-GPRS, s-GPRS') generatorów pierścieniowych z regulowaną szybkością (GPRS, GPRS') przez układ sterujący (US), oraz że do drugiego wejścia (r-US') układu sterującego (US') dołączone jest wyjście innego układu bistabilnego.
4. Generator losowy według zastrz. od 1 do 3, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden układ bistabilny (UB) jest detektorem fazy (DF).
5. Generator losowy według zastrz. od 1 do 4, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden układ bistabilny (UB) jest układem metastabilnościowym (UM).
6. Generator losowy według zastrz. od 1 do 5, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden generator pierścieniowy (GP) zawiera przynajmniej jedną linię opóźniającą (LO), której wejście (i-LO) i wyjście (o-LO) są ze sobą połączone i dołączone do wyjścia generatora pierścieniowego (o-GP), przy czym linia opóźniająca (LO) zawiera elementy opóźniające (EO) połączone w szereg.
7. Generator losowy według zastrz. od 1 do 6, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden generator pierścieniowy z regulowaną szybkością (GPRS, GPRS') zawiera przynajmniej jedną linię opóźniającą (LO), której wejście (i-LO) i wyjście (o-LO) są ze sobą połączone i dołączone do wyjścia generatora z regulowaną szybkością (o-GPRS, o-GPRS'), przy czym linia opóźniająca (LO) zawiera elementy opóźniające (EO) połączone w szereg.

8. Generator losowy według zastrz. 7, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden generator pierścieniowy z regulowaną szybkością (GPRS, GPRS') zawiera przynajmniej jeden dodatkowy element wprowadzający opóźnienie (C), dołączany do linii opóźniającej (LO) do wyjścia jednego elementu opóźniającego (EO) za pomocą klucza (KL, KL'), którego wejście sterujące dołączone jest do wejścia sterującego generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością (s-GPRS, s-GPRS').
9. Generator losowy według zastrz. 7, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden generator pierścieniowy z regulowaną szybkością (GPRS) zawiera linię opóźniającą (LO), w którą jest włączony szeregowo przynajmniej jeden sterowany element opóźniający (T), zaś wejście sterujące (s-T) sterowanego elementu opóźniającego (T) dołączone jest do wejścia sterującego (s-GPRS) generatora pierścieniowego z regulowaną szybkością (GPRS).
10. Generator losowy według zastrz. 9, **znamienny tym**, że sterowany element opóźniający (T) zawiera przynajmniej dwa tranzystory polowe o przeciwnym typie przewodnictwa (P, N), których dreny i źródła są parami połączone i jedna para dołączona jest do wejścia (i-T) sterowanego elementu opóźniającego (T), druga para dołączona jest do wyjścia (o-T) sterowanego elementu opóźniającego (T), a wejście sterujące (s-T) sterowanego elementu opóźniającego (T) dołączone jest do bramek obydwu tranzystorów polowych (P, N).
11. Generator losowy według zastrz. 10, **znamienny tym**, że w tranzystorach polowych (P, N) stosunek długości do szerokości kanału jednego tranzystora przewyższa stosunek długości do szerokości kanału drugiego tranzystora.
12. Generator losowy według zastrz. 10 albo 11, **znamienny tym**, że w szereg z przynajmniej jednym z tranzystorów polowych (P) włączony jest przynajmniej jeden element opóźniający (EO).
13. Generator losowy według zastrz. 10 lub 11 lub 12, **znamienny tym**, że pomiędzy bramki tranzystorów polowych (P, N), a wejście sterujące (s-T) sterowanego elementu opóźniającego (T) włączony jest przynajmniej jeden inwerter (Inv).
14. Generator losowy według zastrz. 1, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden generator pierścieniowy z regulowaną szybkością (GPRS, GPRS') jest generatorem pierścieniowym z przełączaną ścieżką propagacji (GPSP, GPSP').
15. Generator losowy według zastrz. 14, **znamienny tym**, że generator pierścieniowy z przełączaną ścieżką propagacji (GPSP, GPSP') zawiera przynajmniej dwie linie opóźniające (LO1, LO2, LO1', LO2') połączone ze sobą tak, że wyjście pierwszej linii opóźniającej (o-LO1, o-LO1') dołączone jest do wejścia drugiej linii opóźniającej (i-LO2, i-LO2'), oraz że wyjście jednej z tych linii opóźniających (o-LO2, o-LO2') dołączone jest do wyjścia generatora pierścieniowego z przełączaną ścieżką propagacji (o-GPSP, o-GPSP'), przy czym linie opóźniające (LO1, LO2, LO1', LO2') zawierają elementy opóźniające (EO) połączone w szeregi.
16. Generator losowy według zastrz. 15, **znamienny tym**, że generator pierścieniowy z przełączaną ścieżką propagacji (GPSP, GPSP') zawiera przynajmniej jeden multiplexer (MUX, MUX'), którego wejście sterujące (s-MUX, s-MUX') dołączone jest do wejścia sterującego generatora pierścieniowego z przełączaną ścieżką propagacji (s-GPSP, s-GPSP'), oraz którego wyjście (o-MUX, o-MUX') dołączone jest do wejścia jednej linii opóźniającej (i-LO1, i-LO1'), oraz którego wejścia (i0-MUX, i1-MUX, i1-MUX', i0-MUX') dołączone są wejścia i wyjścia innej linii opóźniającej (o-LO2, i-LO2, o-LO2', i-LO2').
17. Generator losowy według zastrz. od 1 do 16, **znamienny tym**, że zawiera przynajmniej dwa układy metastabilnościowe (UM1, UM2, UM3, UM4, UM5), włączone są w linie opóźniające (LO, LO', LO1, LO2, LO1', LO2') tak, że ich końcówki (i1-UM1, i1-UM2, i1-UM3, i1-UM4, i1-UM5, i2-UM1, i2-UM2, i2-UM3, i2-UM4, i2-UM5) są odseparowane w liniach opóźniających (LO1, LO2, LO1', LO2') przynajmniej jednym elementem opóźniającym (EO).
18. Generator losowy według zastrz. od 1 do 17, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden układ metastabilnościowy (UM4, M5) jest włączony pierwszą końcówką (i1-UM4, i1-UM5) w szereg elementów opóźniających składających się na linie opóźniające (LO, LO1, LO2) jednego generatora pierścieniowego (GPRS, GPSP), za elementem opóźniającym (EO) o pierwszym numerze w tym szeregu licząc od elementu opóźniającego (EO) dołączonego wejściem do wyjścia (o-GPRS, o-GPSP) generatora pierścieniowego (GPRS, GPSP), a drugą końcówką (i2-UM4, i2-UM5) jest włączony w szereg elementów opóźniających składających się na linie

- opóźniające (LO, LO1, LO2') drugiego generatora pierścieniowego (GPRS', GPSP'), za elementem opóźniającym (EO) o drugim numerze w tym szeregu licząc od elementu opóźniającego (EO) dołączonego wejściem do wyjścia (o-GPRS', o-GPSP') generatora pierścieniowego (GPRS', GPSP') tak, że pierwszy numer jest różny od drugiego numeru.
19. Generator losowy według zastrz. od 1 do 18, **znamienny tym**, że przynajmniej dwa układy metastabilnościowe (UM6, UM7) są włączone przynajmniej jedną końcówką każdy (i1-UM6, i1-UM7; i2-UM6, i2-UM7) w tym samym miejscu przynajmniej jednej linii opóźniającej (LO, LO', LO2, LO2').
  20. Generator losowy według zastrz. 2, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden układ sterujący (US) zawiera przynajmniej jeden element opóźniający (EO).
  21. Generator losowy według zastrz. 3, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden układ sterujący (US') zawiera bramkę dodawania losowości (XOR'), której pierwsze wejście stanowi wejście danych losowych układu sterującego (r-US'), drugie wejście stanowi wejście sygnałowe układu sterującego (i-US'), a wyjście bramki dodawania losowości (XOR') stanowi wyjście układu sterującego (o-US').
  22. Generator losowy według zastrz. 21, **znamienny tym**, że pierwsze wejście bramki dodawania losowości (XOR') dołączone jest do wejścia danych losowych układu sterującego (rUS') przez układ bramkujący (AND'), oraz że do układu bramkującego (AND') dołączony jest układ sterowania bramkowaniem (LCZ').
  23. Generator losowy według zastrz. 21, **znamienny tym**, że drugie wejście bramki dodawania losowości (XOR') oraz jej wyjście połączone są w szereg z co najmniej jednym elementem opóźniającym (EO'), przy czym wejście pierwszego w szeregu elementu dołączone jest do wejścia sygnałowego układu sterującego (i-US'), a wyjście ostatniego w szeregu elementu dołączone jest do wyjścia układu sterującego (o-US').
  24. Generator losowy według zastrz. 21, **znamienny tym**, że pierwsze wejście bramki dodawania losowości (XOR') dołączone jest do wejścia danych losowych układu sterującego (rUS') przez układ bramkujący (AND'), oraz że do układu bramkującego (AND') dołączony jest układ sterowania bramkowaniem (LCZ'), oraz że drugie wejście bramki dodawania losowości (XOR') oraz jej wyjście połączone są w szereg z co najmniej jednym elementem opóźniającym (EO'), przy czym wejście pierwszego w szeregu elementu dołączone jest do wejścia sygnałowego układu sterującego (1-US'), a wyjście ostatniego w szeregu elementu dołączone jest do wyjścia układu sterującego (o-US').
  25. Generator losowy według zastrz. 4, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden detektor fazy (DF) stanowi przerzutnik (P) o dwóch wejściach (D, C) stanowiących wejścia detektora fazy (i1-DF, i2-DF) i wyjściu (Q) stanowiącym wyjście detektora fazy (o-DF).
  26. Generator losowy według zastrz. 4, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden detektor fazy (DF) zawiera dwa przerzutniki (P1), (P2) o dwóch wejściach (D1, C1), (D2, C2) i dwóch wyjściach (Q1, nQ1), (Q2, nQ2) każdy, który ma wejścia przerzutników dołączone do wejść detektora fazy i który ma wyjścia przerzutników dołączone do wyjść detektora fazy, przy czym pierwsze wejście detektora fazy (i1-DF) dołączone jest jednocześnie do pierwszego wejścia pierwszego przerzutnika (D1) i drugiego wejścia drugiego przerzutnika (C2), drugie wejście detektora fazy (i2-DF) dołączone jest jednocześnie do drugiego wejścia pierwszego przerzutnika (C1) i pierwszego wejścia drugiego przerzutnika (D2), a wyjście detektora fazy (o-DF) dołączone jest do wybranych wyjść przerzutników (nQ1, Q2) przez układ logiczny (AND).
  27. Generator losowy według zastrz. 5 albo 17 albo 18 albo 19, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden układ metastabilnościowy (UM) stanowi przerzutnik (Pa) o dwóch wejściach (Da, Ca) stanowiących wejścia układu metastabilnościowego (i1-UM, i2-UM) i wyjściu (Qa) stanowiącym wyjście układu metastabilnościowego (o-UM).
  28. Generator losowy według zastrz. 5 albo 17 albo 18 albo 19, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden układ metastabilnościowy (UM) zawiera układ metastabilnościowy z oscylacyjną odpowiedzią impulsową (UMOO) o dwóch wejściach (R, S) stanowiących wejścia układu metastabilnościowego (i1-UM, i2-UM) i wyjściu (wOO) stanowiącym wyjście układu metastabilnościowego (o-UM).
  29. Generator losowy według zastrz. 28 **znamienny tym**, że wyjście układu metastabilnościowego z oscylacyjną odpowiedzią impulsową (wOO) dołączone jest do wyjścia układu metastabilnościowego (o-UM) przez sumator (SUM).

30. Generator losowy według zastrz. 29, **znamienny tym**, że zawiera układ liczący (LCZ), którego wyjścia dołączone są do kolejnych wejść sumatora (SUM), a którego wejście (i-LCZ) dołączone jest do wyjścia układu metastabilnościowego z oscylacyjną odpowiedzią impulsową (wOO).
31. Generator losowy według zastrz. 5 albo 17 albo 18 albo 19, **znamienny tym**, że przynajmniej jeden układ metastabilnościowy (UM) zawiera generator metastabilnościowych interwałów czasowych (GMIC) o wejściach dołączonych do wejść układu metastabilnościowego (i1-UM, i2-UM) oraz wyjściach dołączonych do wejść arbitra (ARB), którego wyjścia dołączone są do wyjść układu metastabilnościowego (o-UM) przez układ logiczny (AND).
32. Generator losowy według zastrz. 31, **znamienny tym**, że generator metastabilnościowych interwałów czasowych (GMIC) zawiera dwa przerzutniki (Pb), (Pc) o dwóch wejściach (Db, Cb), (Dc, Cc) i pojedynczych wyjściach (Qb), (Qc), przy czym wejścia przerzutników generatora metastabilnościowych interwałów czasowych (GMIC) dołączone są do wejść układu metastabilnościowego (UM) w taki sposób, że pierwsze wejście układu metastabilnościowego (i1-UM) dołączone jest jednocześnie do pierwszego wejścia pierwszego przerzutnika (Db) i pierwszego wejścia drugiego przerzutnika (Dc), drugie wejście układu metastabilnościowego (i2-UM) dołączone jest jednocześnie do drugiego wejścia pierwszego przerzutnika (Cb) i drugiego wejścia drugiego przerzutnika (Cc), oraz że arbiter (ARB) zawiera dwa przerzutniki (Pd), (Pe) o dwóch wejściach (Dd, Cd), (De, Ce) i dwóch wyjściach (Qd, nQd), (Qe, nQe) każdy, przy czym wyjścia przerzutników generatora metastabilnościowych interwałów czasowych (GMIC) dołączone są do wejść przerzutników arbitra (ARB) w taki sposób, że wyjście pierwszego przerzutnika generatora metastabilnościowych interwałów czasowych (Qb) dołączone jest jednocześnie do pierwszego wejścia pierwszego przerzutnika arbitra (Dd) i drugiego wejścia drugiego przerzutnika arbitra (Ce), wyjście drugiego przerzutnika generatora metastabilnościowych interwałów czasowych (Qc) dołączone jest jednocześnie do drugiego wejścia pierwszego przerzutnika arbitra (Cd) i pierwszego wejścia drugiego przerzutnika arbitra (De), oraz że układ logiczny (AND) stanowi bramka koniunkcji, przez którą wybrane wyjścia przerzutników arbitra (nQd, Qe) dołączone są do wyjścia układu metastabilnościowego (o-UM).

Rysunki

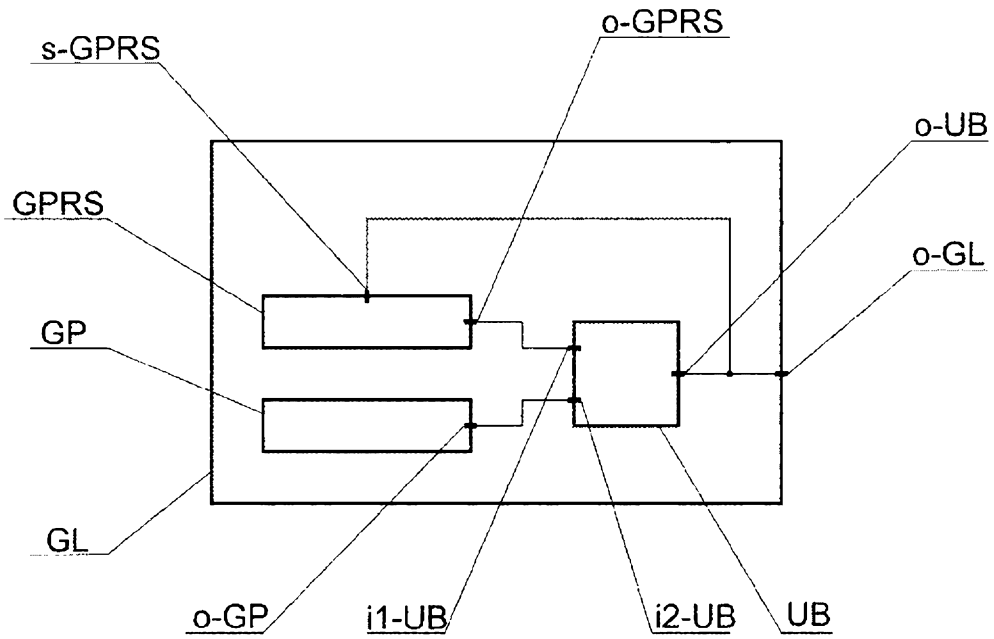


Fig. 1

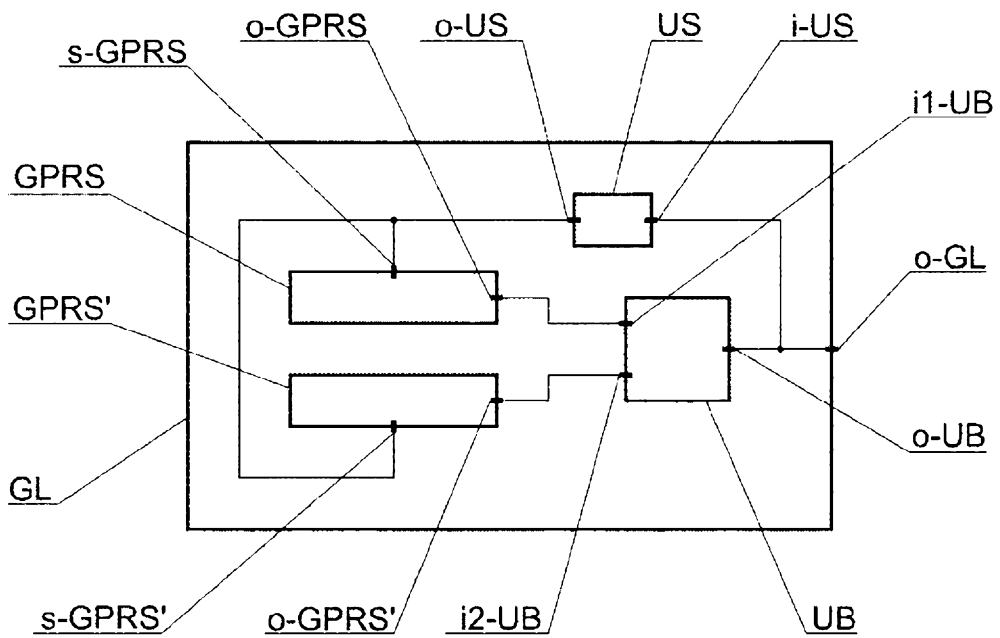


Fig. 2

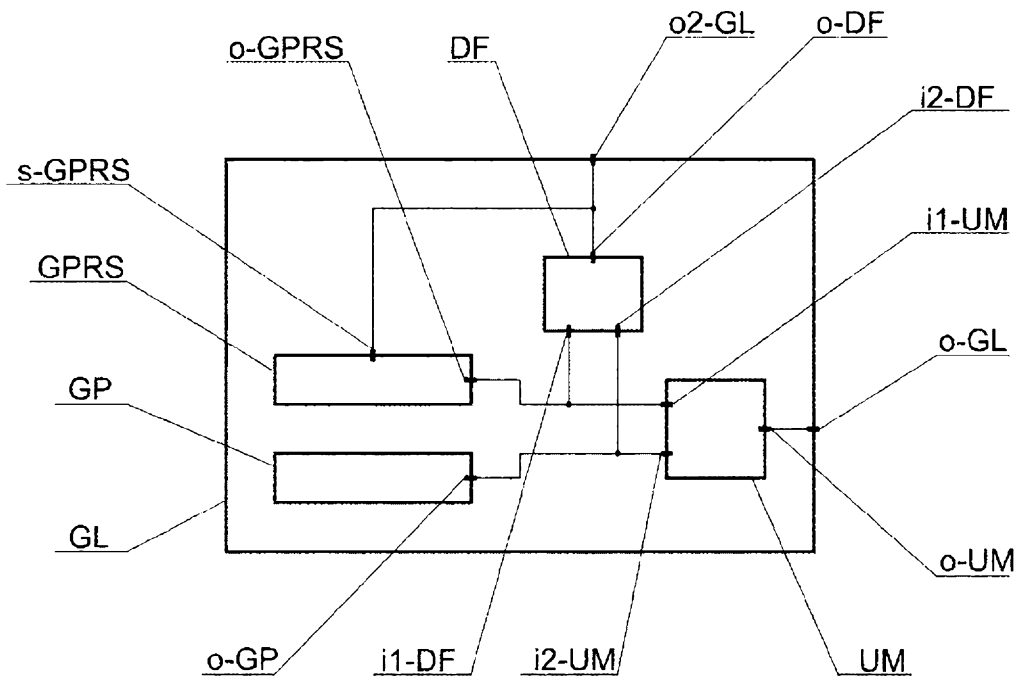


Fig. 3

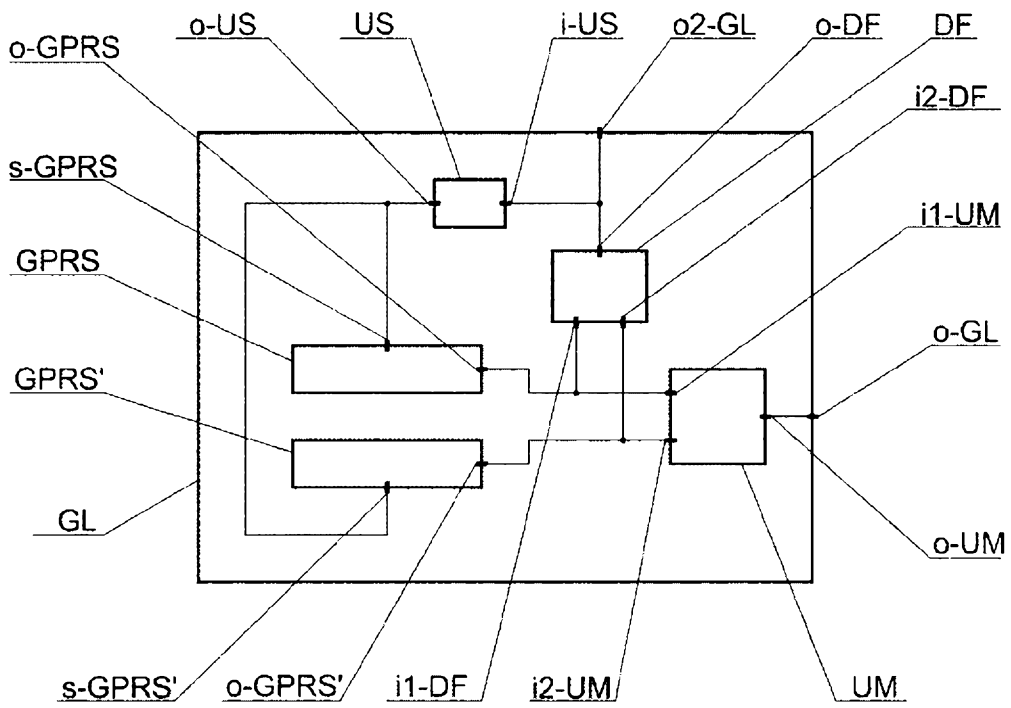


Fig. 4

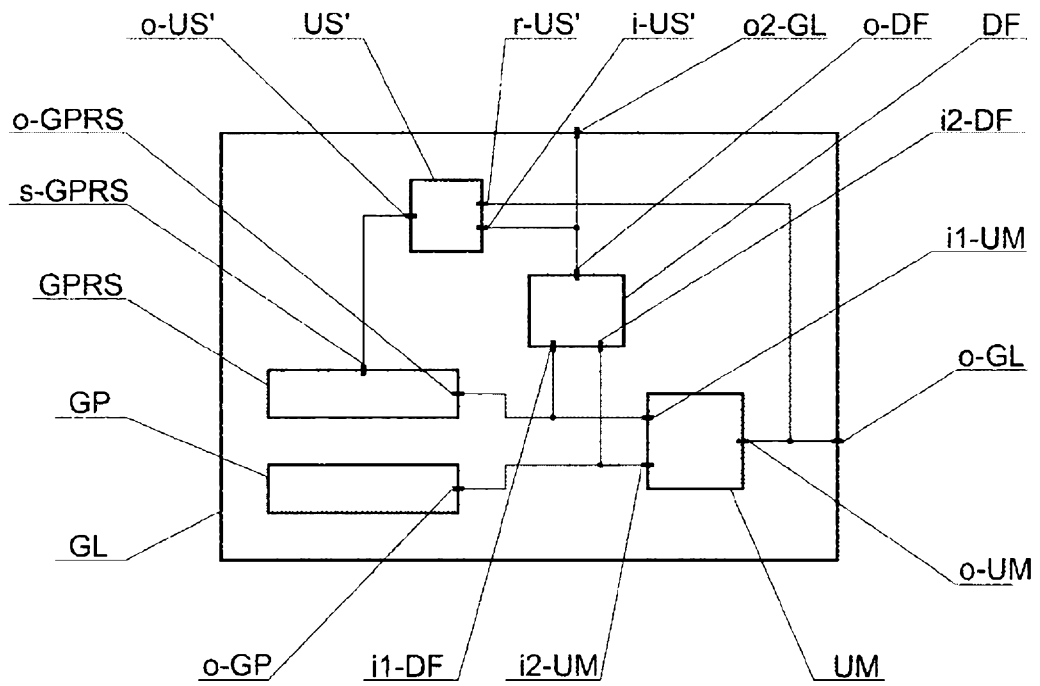


Fig. 5

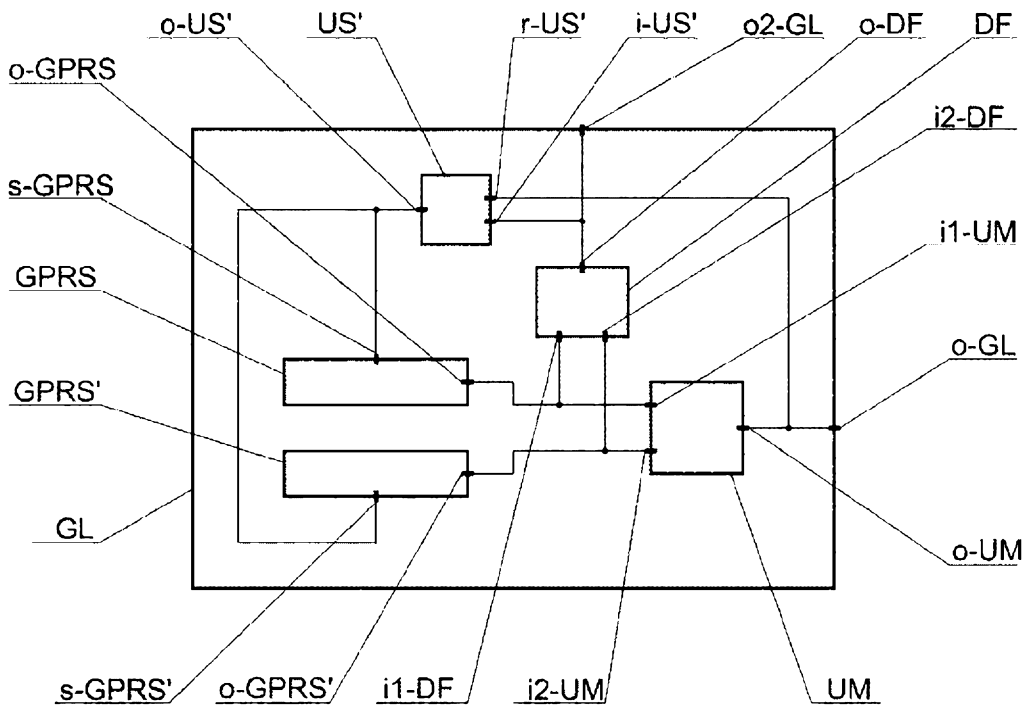


Fig. 6

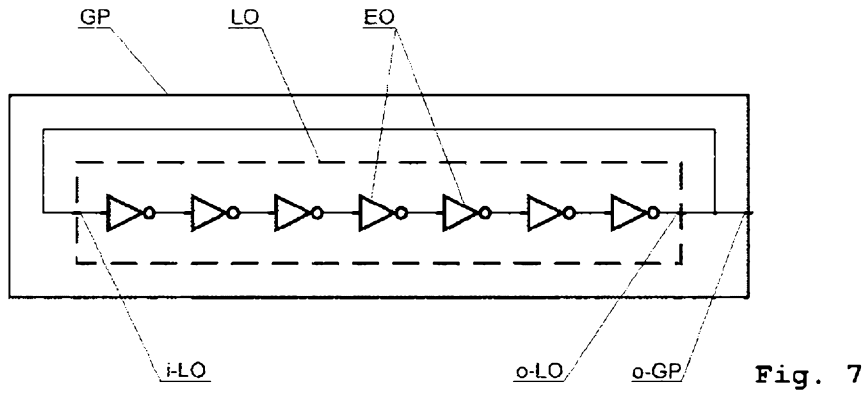


Fig. 7

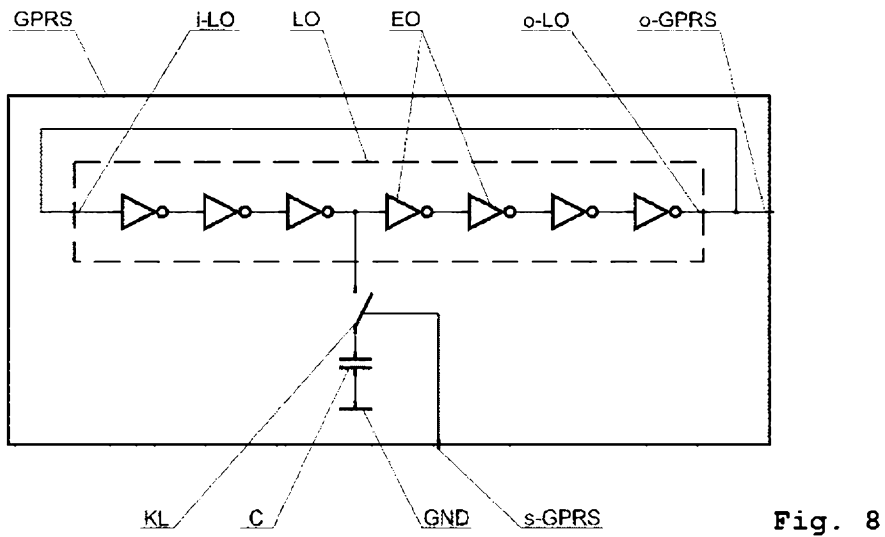


Fig. 8

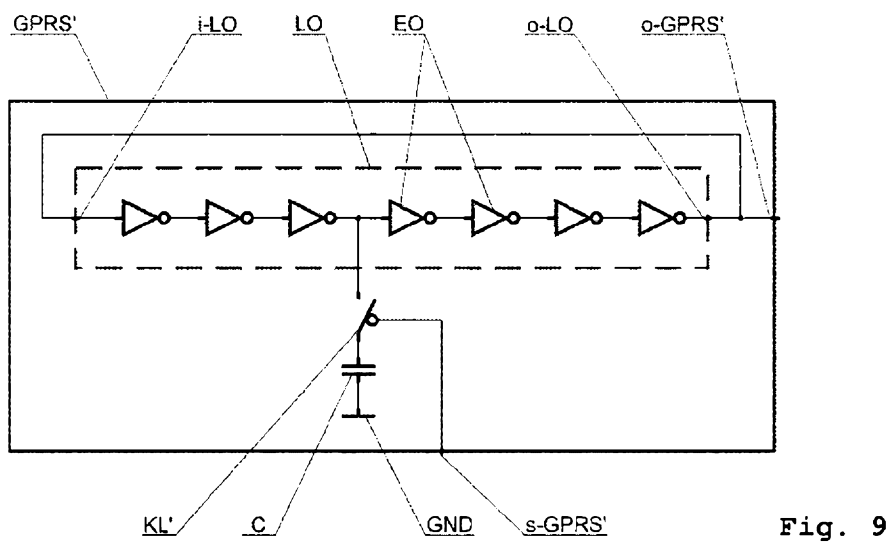


Fig. 9

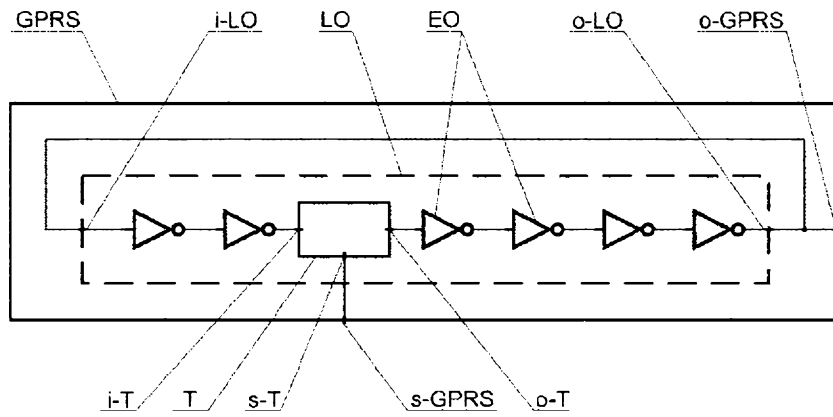


Fig. 10

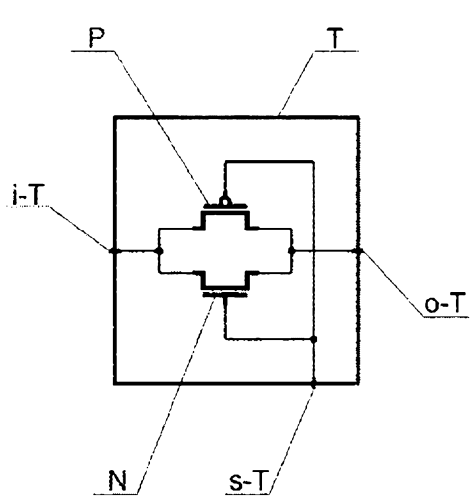


Fig. 11

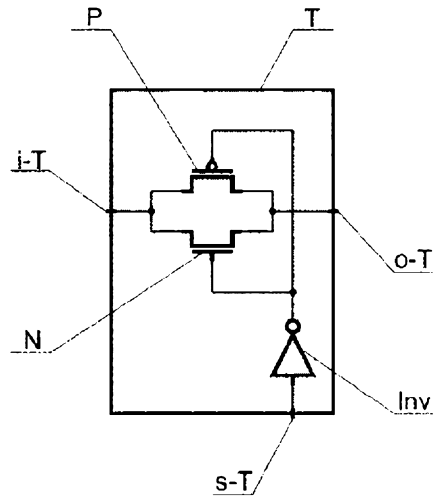


Fig. 13

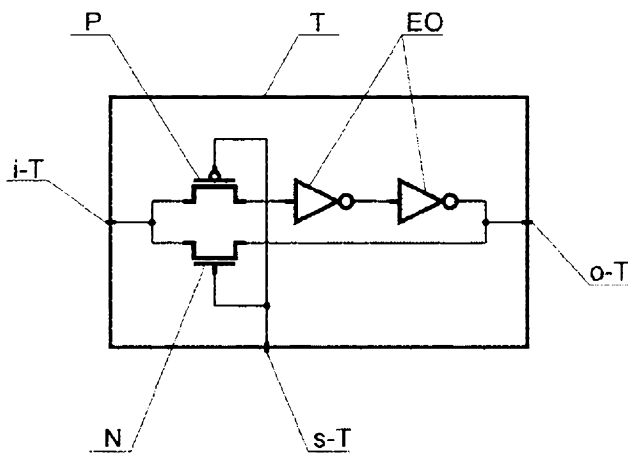


Fig. 12

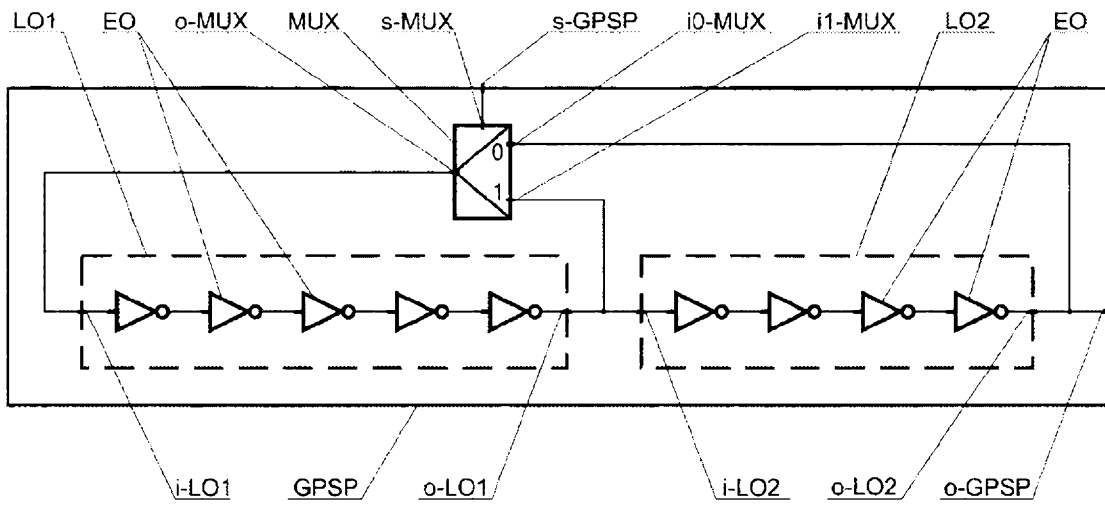


Fig. 14

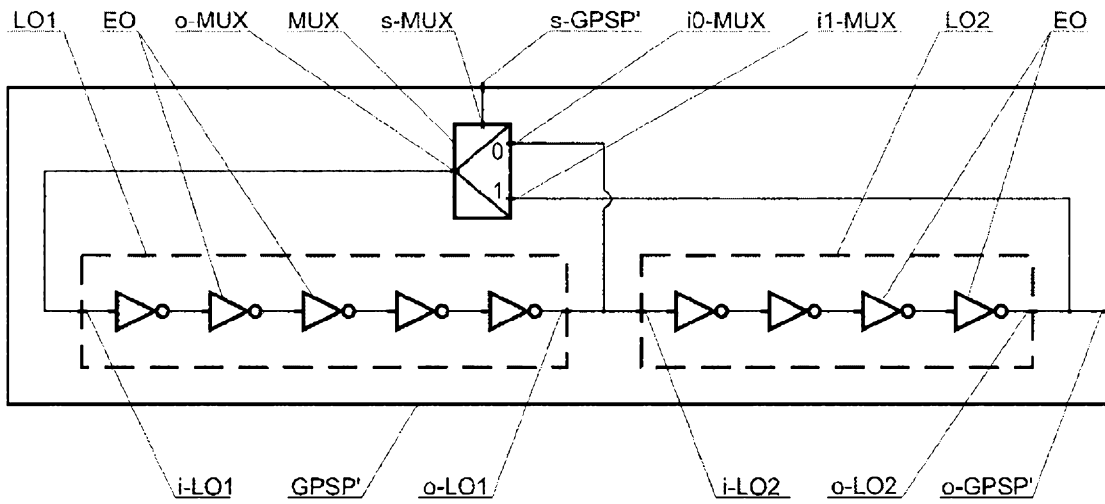


Fig. 15

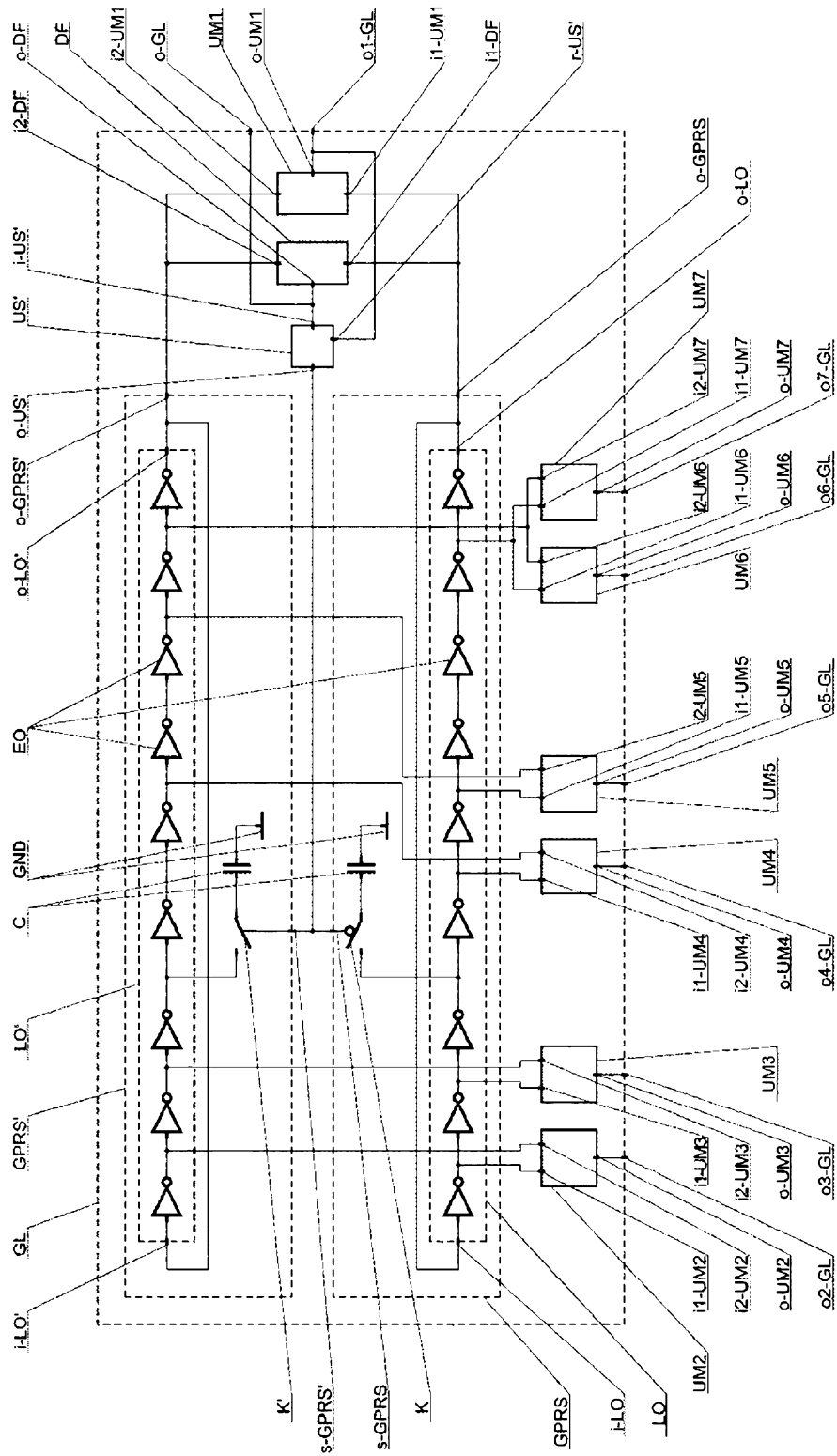


Fig. 16

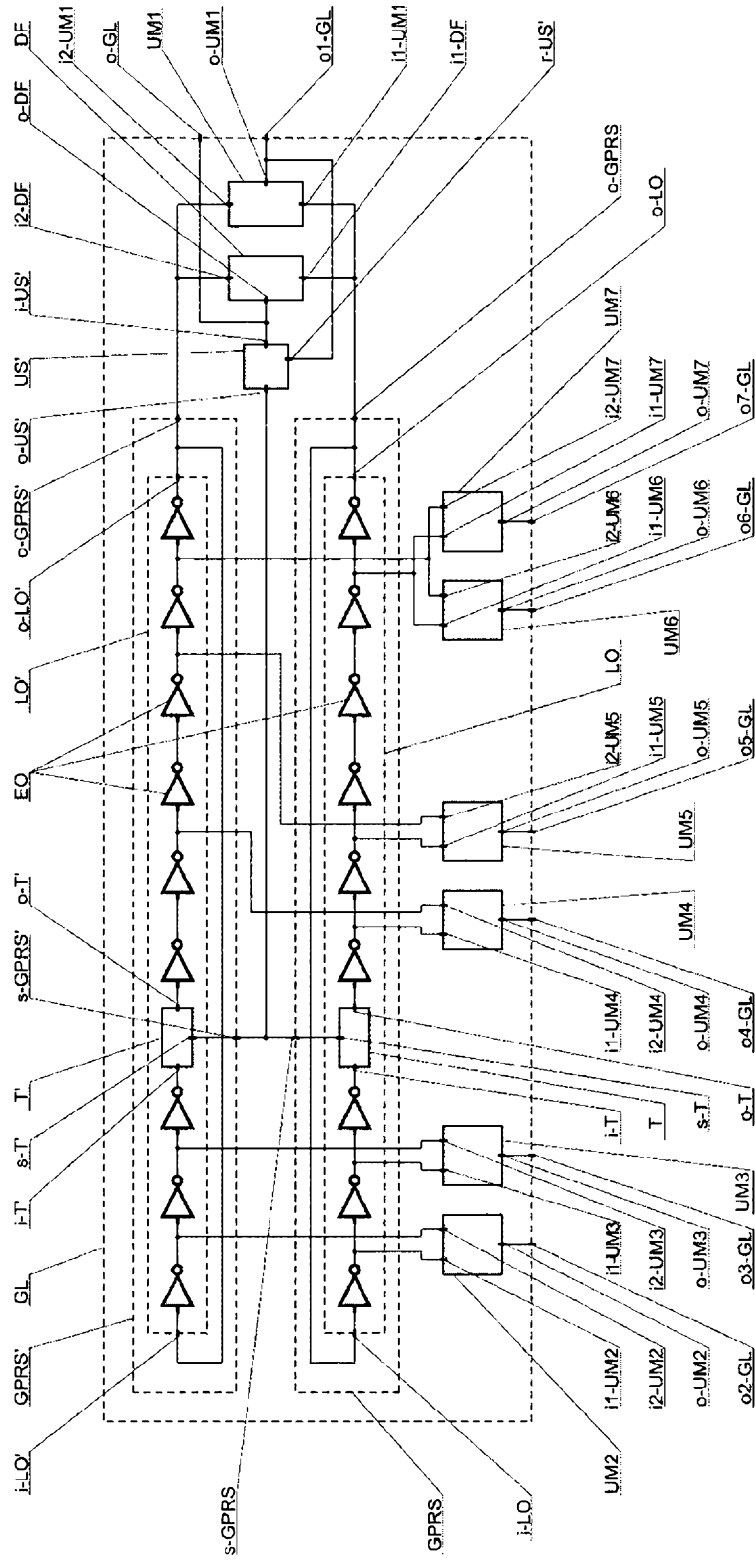


Fig. 17

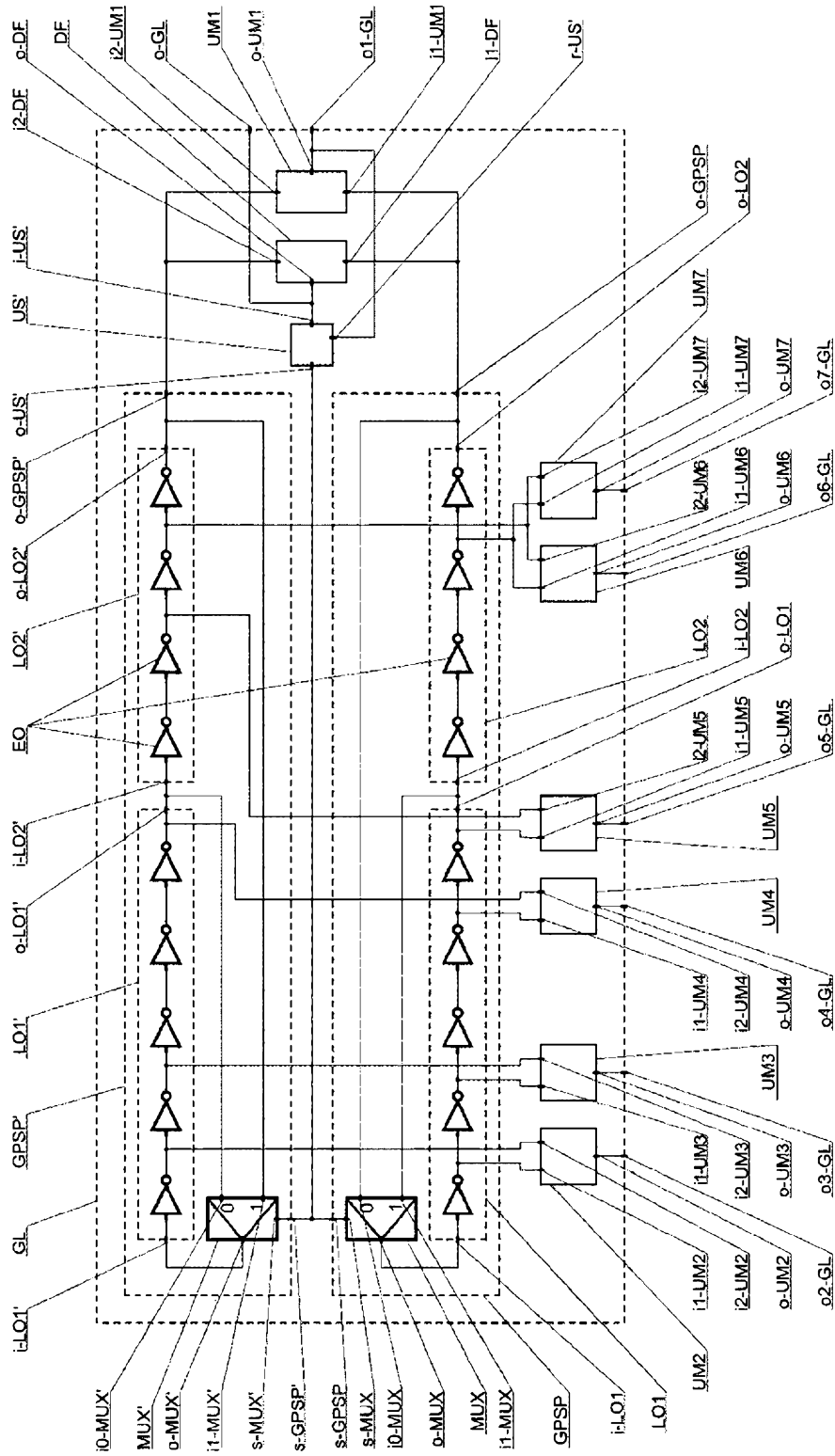


Fig. 18

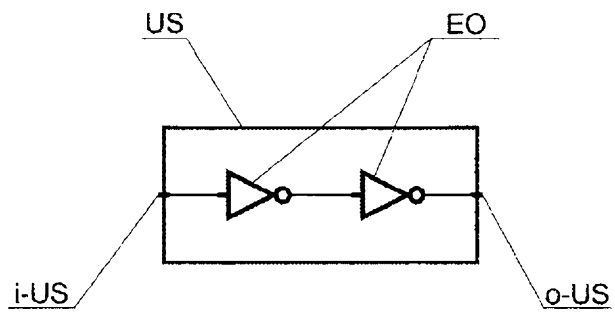


Fig. 19

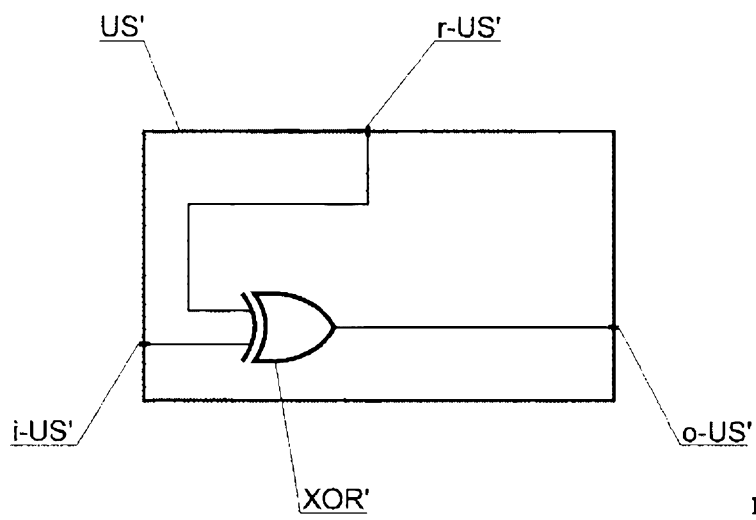


Fig. 20

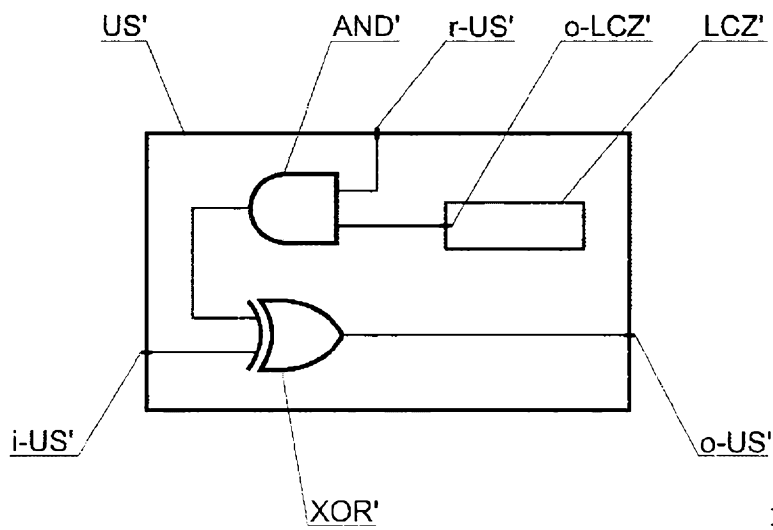


Fig. 21

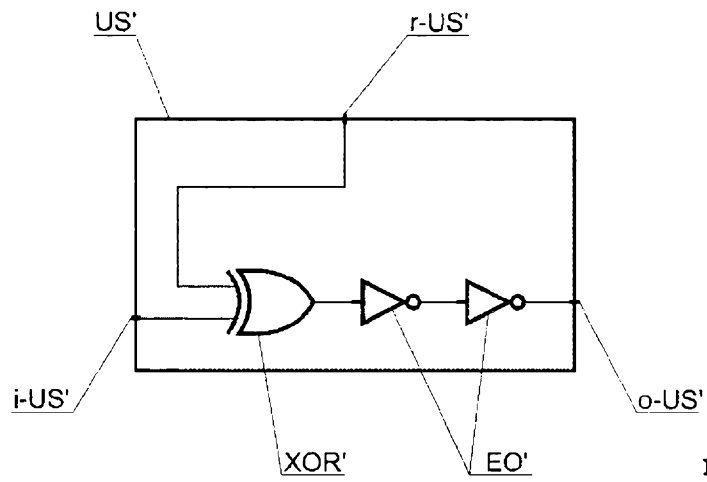


Fig. 22

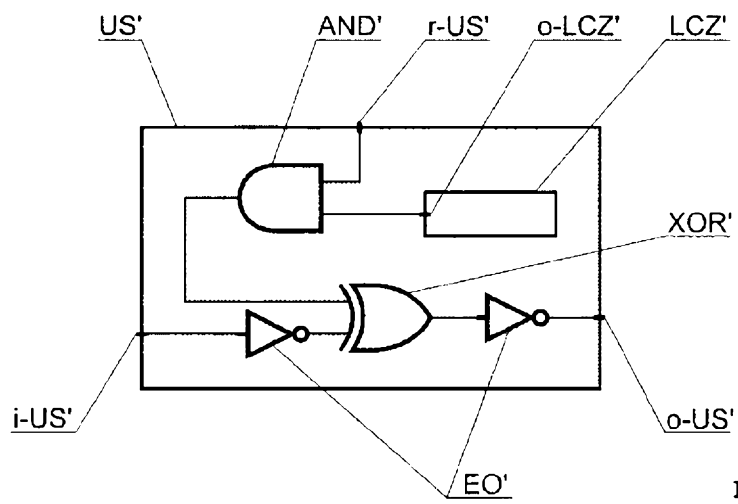


Fig. 23

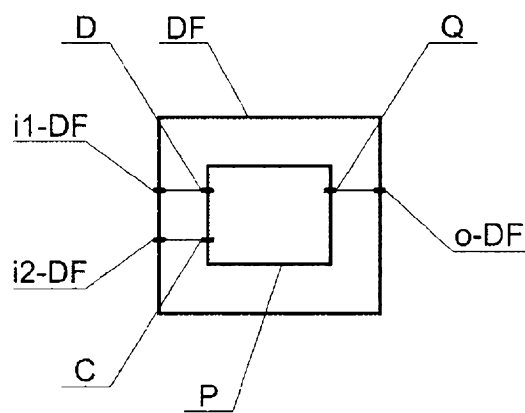
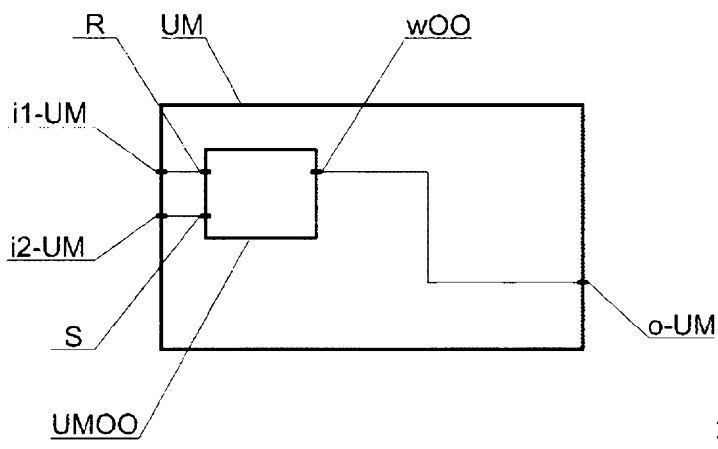
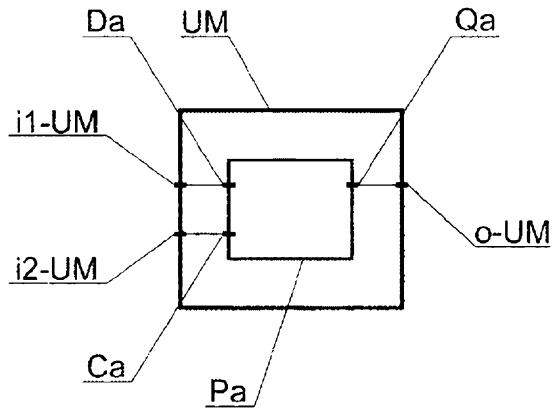
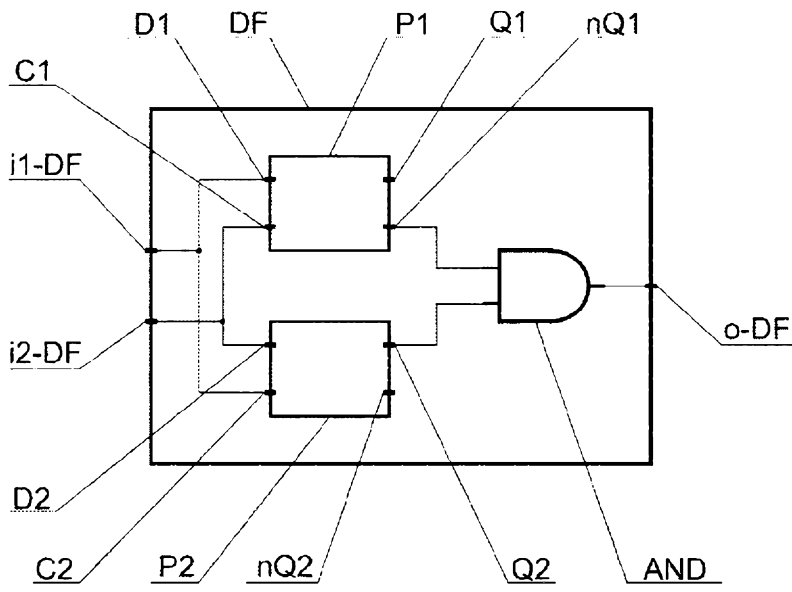


Fig. 24



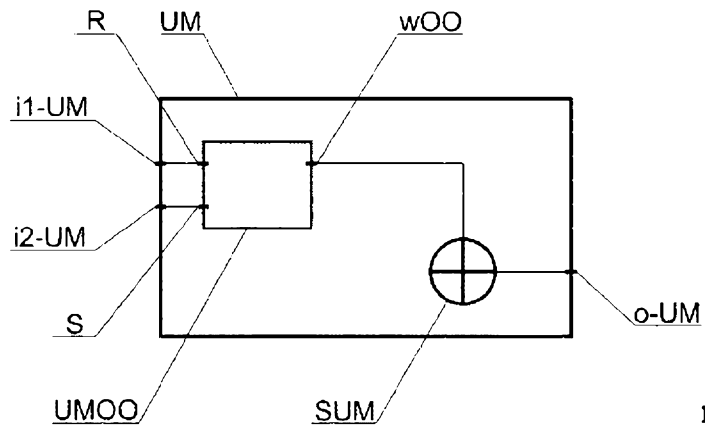


Fig. 28

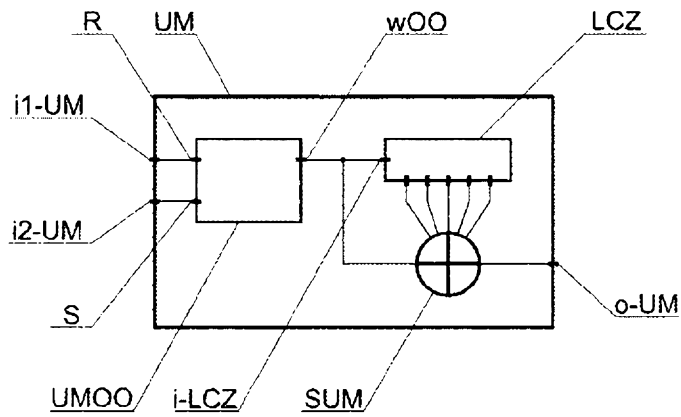


Fig. 29

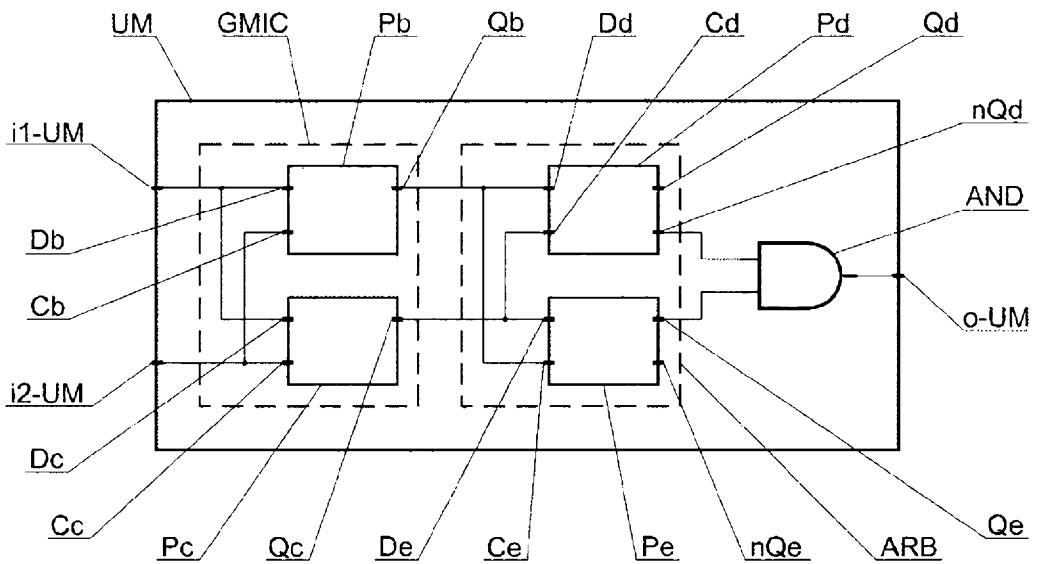


Fig. 30