## 3-лекция

## Автотербелмелі жүйелердің синхронизациясы

Синхронизацияның анықтамасы және түрлері. Адлер теңдеуі. Арнольд диаграммасы. Автогенератордың еріксіз синхронизациясы.

Синхронизация дегеніміз байланысқан осцилляторлардың өзара келісімді тәртіппен қозғалуын айтамыз. Сыртқы күш жиілігінің белгілі бір интервалында жүйенің тербелісі сыртқы күшпен жиілік бойынша синхрондалады. Әсерлесу интенсивтілігі неғұрлым үлкен болса, бұл жиіліктік интервал соғұрлым кең болады (резонанс жағдайынан өзгешелігі).

Синхронизация құбылысы табиғаттағы әртүрлі жүйелерде — электронды құрылғыларда, лазерлерде, механикалық жүйелерде, биологиялық объектерде, әлеуметтік жүйелерде байқалады. Синхронизация ашық жүйелердегі универсал өзқауым құбылысының дербес жағдайы болып табылады. Синхронизация тек қана әсер етуші жиілікте емес, сондай-ақ, әсер етуші жиілік пен оған ілескен жиіліктің қатынастары еселі және рационал сандар болған жағдайда болуы мүмкін:

$\frac{w_1}{w_2} = 1,2,3;$ *½, 1/3, 2/3,...* т.с.с. Бұл құбылыстар сәйкесінше гармоникада және субгармоникада синхрондалу деп аталады.

Автотербелмелі жүйелерде синхронизацияның екі түрі бар: еріксіз (сыртқы күш арқылы) және өзара (ішкі әсер). Еріксіз синхронизация кезінде кері байланыс болмайды:

$$\vec{x} = \vec{F}(\dot{\vec{x}}) + \vec{f}(t)\ , \qquad (1)$$

мұндағы $\vec{f}(t)$ — еріксіз күш векторы (сыртқы күш). $\vec{x} = \vec{F}(\vec{x})$ — автономды жүйелердің теңдеуі.

Синхронизация жоқ кезде сыртқы күш әсеріндегі автотербелмелі жүйе «соғу» режимінде, яғни екі жиілікті квазипериодты тербелістер режимінде болады.

Автотербелістер периодты, квазипериодты, хаосты болуы мүмкін. Сондықтан синхронизация туралы жалпылама мағынада былай айтуға болады: синхронизация бұл тек қана жиіліктік сәйкестік емес, басқа да физикалық сипаттамалардың сәйкестенуі, жүйенің лездік күйлерінің арасындағы функционалды өзара байланыстың болуы.

Жалпы түрде синхронизация құбылысы тербеліс фазасының өзгерісімен сипатталады, себебі жиілік фазаның уақыт бойынша туындысымен анықталады.

Сыртқы күштің әсері болмағанда фазаның әр түрлі бастапқы мәндері болуы мүмкін. Мысалы:

$$x(t) = Acos(w_0 t + \varphi_0) = Acos\varphi(t), \quad w_0 = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad . \qquad (2)$$

Егер $\varphi_1(t)$, $w_1$; $\varphi_2(t)$, $w_2$ — екі автогенератордың фазасы және жиілігі болса, онда синхронизация шартын былай жазуға болады:

$$m\varphi_1(t) - n\varphi_2(t) = const, \;\; mw_1 = nw_2 \;, \qquad (3)$$

мұндағы m,n — нақты сандар. Бұл шарт жиілікті (фазаны) **қармау** құбылысы деп аталады.

Сыртқы периодты күш әсер еткен жағдайда автогенератор фазасының өзгерісін қарастырайық. Әсерлесуші генераторлар тербелістерінің жиіліктер және фазалар айырымын сәйкесінше $\varphi(t)$ и $\Delta$ арқылы белгілейміз. Онда мынаны жазуға болады:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = -\Delta + u(t) \;\; , \qquad (4)$$

мұндағы $\Delta$ — әсер етуші жиіліктің автотербелістің меншікті жиілігінен айырымы, $u(t)$— сыртқы күш. $u(t)$ шамасын белгілі бір электрондық жүйенің шығыс кернеуі ретінде қарастырайық:

$$u(t) = \int h(t - t')f(t')dt' \;\; , \qquad (5)$$

мұндағы $f(t')$ — кіріс кернеуі, $h(t - t')$ — жүйенің импульстік сипаттамасы. Ең қарапайым жағдайда: $h(t - t') = \delta(t - t')$, $f(t') = \varepsilon sin\varphi(t')$, мұндағы $\delta(t - t')$ — дельта функция, $\varepsilon$ — сыртқы күш амплитудасы. Бұдан кейін (4) формула мынадай түрде жазылады:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = -\Delta + \varepsilon sin\varphi(t) \quad . \qquad (6)$$

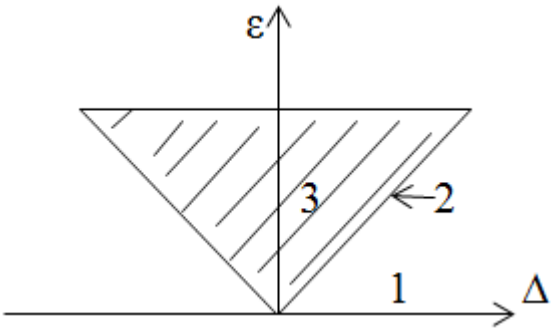
Бұл теңдеу Адлер теңдеуі деп аталады. Әдетте ол сыртқы күш әсер еткендегі Ван-дер-Поль теңдеуінен аз амплитудаларды жуықтау әдісімен алынады. Егер $u(\varphi) = \varphi \cdot \Delta + \varepsilon cos\varphi$ функция енгізсек, онда (6) формула былайша жазылады:

$$\dot{\varphi} = -\frac{\partial u}{\partial \varphi} \;. \qquad (7)$$

$u(\varphi)$ потенциалдық функцияның сипатын талдағанда оның $\left|\frac{\varepsilon}{\Delta}\right|$-дан тәуелділігін қарастырған ыңғайлы. $\left|\frac{\varepsilon}{\Delta}\right|$<1 кезінде потенциал $\varphi$-ға монотонды тәуелді. $\left|\frac{\varepsilon}{\Delta}\right| = 1$ кезінде бұл тәуелділіктің майысу нүктесі пайда болады. $\left|\frac{\varepsilon}{\Delta}\right| > 1$ потенциалдық

функция максимумдары және минимумдары бар бірмәнді емес күйде қалады. $u(\varphi)$ потенциалының минимум нүктелерінде тербеліс фазасының айырымы уақыт бойынша өзгермейді, бұл синхронизация режиміне сәйкес келеді.

Егер біз сыртқы күштің амплитудасы $\varepsilon$ – ға белгілі бір мән берсек және оның жиілігін (яғни $\Delta$ параметрін) өзгертсек, онда $|\Delta| < \varepsilon$ белгілі мәндерінің интервалында ғана синхронизация болады. Бұл синхронизация жолағы деп аталады. Оның ені сыртқы күштің амплитудасына тура пропорционал. Параметрлердің $(\Delta, \varepsilon)$ жазықтығында синхронизация режиміне сәйкес келетін тіл тәріздес аймақты **Арнольд тілі** деп те атайды (1 сурет).




1-сурет. Синхронизация аймағы (3), бейсинхрондық режим (1), өтпелі режим (2).

Өзіндік жұмыс тақырыптары

1. Периодты сыртқы күш әсер еткендегі Ван-дер-Поль осцилляторы.
2. Синхронизация пайда болар кездегі бифуркациялар.
3. Ван-дер-Поль осцилляторының синхрондалуы бойынша сандық (компьютерлік) нәтижелерді алу.

Әдебиет

[1,8,9]

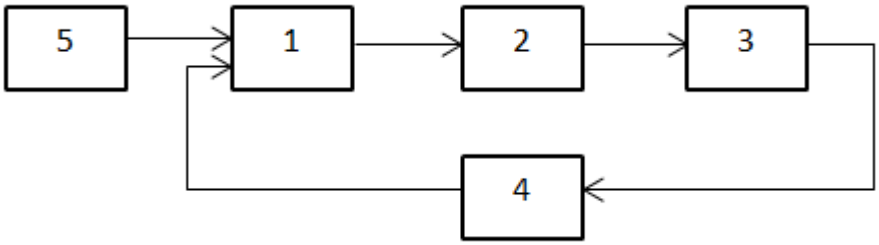
## 4-лекция

## Жиіліктердің фазалық автоүйлестірілуі.

Кері байланыстағы бейсызық құрылғылар. Фазаны синхрондау тұзағы: кернеуі басқарылатын генератор, төменгі жиілікті фильтр, фазалық компаратор. Заманауи байланыс жүйелерінде синхронизацияны қолдану.

Нақтылы электронды байланыс жүйелерінде жоғары тұрақты жиілік жолағы қолданылады және берілген қадаммен жиілікті өзгерту іске асады, яғни жиілікті синтездеу. Синтезаторлардың жиіліктері $10^9$Гц (ГГц) болып, олар **жиіліктерді фазалық автоүйлестіру (ЖФАҮ)** автогенераторы негізінде жасалынады. ЖФАҮ жүйесінде сигналдың кернеуі немес ток шамасы емес, оның фазасы немесе жиілігі реттеледі.

ЖФАҮ жүйесі төрт негізгі блоктан тұрады (1-сурет): фазалық компаратор немесе фазалық детектор (дискриминатор) (1), төменгі жиілікті фильтр (2), күшейткіш (3), кернеу басқаратын генератор (4). Бұл блоктар олардың әрбіреуі үшін қарастырылған сыртқы кірулері және шығулары бар интегралдық схемада құрастырылған. Сыртқы кіріс сигналы (5) блокка (1) беріледі.




1-сурет. ЖФАҮ тұзағының құрылымдық схемасы

Сыртқы тірек сигнал жоқ кезде (4) генератор $w_0$ меншікті жиілікте жұмыс істейді. (5) элементтен сыртқы сигнал түскенде, компаратор (1) $w_0$ жиілікпен сыртқы сигналдың $w$ жиілігін салыстырады. Компаратордың шығыс сигналы $w$ және $w_0$ екі сигналдың жиіліктерінің көбейтіндісінен тұрады, сондықтан онда $w \mp w_0$ жиіліктері бар. Компаратор сыртқы $u(w)$ кернеуді түзетеді және оны $u(w)$ және $u(w_0)$ фазалар айырымына пропорционал шығыс кернеуді алу үшін интегралдайды, яғни $\Delta w = w - w_0$ ретті төменгі жиілікте фильтрлейді. Аз жиілік (фаза) айырымы $\Delta w$ кезінде компаратордың (дискриминатор, фазалық детектор) шығысындағы кернеу немесе ток $\Delta w$-ға пропорционал. Мұндай өзгеріс амплитуда-жиілікті, фаза-жиілікті тәуелділік шарттарымен болады.

Кернеуді көбейткіштің құрылымдық схемасының модулятор схемасынан айырмашылығы жоққа тән. Араластырушы тізбекке бейсызық элемент –

шалаөткізгіштік диод кіреді. Екі кернеуді көбейту эффекті диодтың вольт-амперлік сипаттамасының бейсызықтығы арқасында орындалады:

$$I = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 \quad . \qquad (1)$$

Егер

$$u = u_0 cos w_0 t + u_1 cos wt \quad , \qquad (2)$$

онда (1)-ге (2)-ні қойып біз араласқан, $\cos(w - w_0)\, t$ мүшесі бар, яғни төменгі жиілікті ( $\Delta w = w - w_0$) сигнал аламыз.

1-суреттегі (2), (3) блоктардың жұмыс істеу принциптері бізге өткен лекциялардан белгілі. (4)-ші блоктың, яғни кернеумен басқарылатын генератордың (нақтырақ — автономды мультивибратор) жұмыс істеу принципін толығымен қарастырайық.

Автогенератордың тербеліс жиілігі мынаған тең: $w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_\Sigma}}$, мұндағы $C_\Sigma$ — контур сыйымдылықтарының қосындысы. Егер контурға варикапты, яғни p-n өткелі бар сыйымдылықты өзгертетін диодты қоссақ, онда C өзгерісі арқылы $w_0$ шамасын өзгертуге болады. Варикап сыйымдылығының кернеуден тәуелділігі **вольт-фарадтық сипаттама** деп аталады:

$$\mathrm{C}(u) = C(0)\left(\frac{\varphi}{\varphi + u}\right)^{\nu} \quad , \qquad (3)$$

мұндағы $\varphi$ – ($\varphi \sim 0{,}5 \div 0{,}8$В), $\nu \sim 0{,}5 \div 2$ диодтағы контакттағы потенциалдар айырымы. Жуықталған түрде:

$$\frac{\Delta w}{w_0} = const\ \frac{\Delta \mathrm{C}}{C}. \qquad (4)$$

Варикап контурдағы конденсатордың $C_0$ тұрақты сыйымдылығымен тізбектей және параллель жалғанған болуы мүмкін.

Қарастырылған жиілікті синтездеу әдісі тура әдісі деп аталады. Әртүрлі шығыс жиіліктерін алу үшін жанама синтездеу кезінде жиілік бөлгіш (күшейткіш), кері байланыспен басқару (мысалы, ЖФАҮ жүйесі негізінде) қолданылады. Жиілікті бөлгіш ең қарапайым схема — программаланатын сандық реверсивтік (кері) санағыш.

ЖФАҮ ілмегі (тұзағы) — әртүрлі функцияны іске асыратын универсал схема: ол аналогты және цифрлық модуляция, демодуляция, сигналдарды өңдеу, тасымалдайтын және тактілі жиілікті қайта орнату, жиілікті синтездеу сияқты функцияларды атқарады. ЖФАҮ схемасы катушканың индуктивтілігін және

дроссельді қолданбай-ақ жиілікті селекциялау және фильтрлеу амалдарын нақты іске асыруға мүмкіндік береді.

**Өзіндік жұмыс тақырыптары**.

1. Фазалық компараторлар.
2. ЖФАҮ ілмегінің күшейту коэффициенті.
3. ЖФАҮ ілмегінің фильтрлеу құрамы.

**Әдебиет**

[2,4,7]

## 8-лекция

## Аса кеңжолақты динамикалық хаос генераторлары.

Динамикалық жүйелер, динамикалық хаос. Телекоммуникацияда динамикалық хаосты қолданудың артықшылықтары. Фазалық басқарылатын динамикалық хаос генераторы.

1. Хаосты сигналдардың қасиеттері.

Динамикалық жүйе деп кез келген уақыт мезетінде күйі бірмәнді анықталатын объектіні немесе процесті айтамыз. Бейсызық эволюция кезінде және жүйе параметрлерінің белгілі мәндерінде қасиеттері статистикалық құбылыстарға жақын хаосты автотербелістер пайда болуы мүмкін. Бұл кезде жүйе динамикасында шуыл ескерілмейді.

Динамикалық хаосты айнымалылардың бастапқы мәндерін дәл бере отырып, қайта дәл қалпына келтіру мүмкіндігі оның басты ерекшелігі болып табылады. Сондықтан динамикалық хаосты информацияны қорғау мақсатында қолданудың болашағы зор: информациялық және хаосты сигналдарды араластырып бере отырып, қабылдағышта информациялық сигналды бөліп алуға болады.

Динамикалық хаостың спектрлік функциясы жүйе параметрлеріне сезімтал. Телекоммуникациялық каналдар санын көбейтуде қолданылатын аса кеңжолақты хаосты сигналдарды алуға болады. Аса кеңжолақты сигналдар деп салыстырмалы жолақ ені мынаған тең сигналдары айтайды:

$$\Delta f = \frac{f_{max} - f_{min}}{2(f_{max} + f_{min})} > 0,2 \ , \qquad (1)$$

мұндағы $f_{max}, f_{min}$ — сәйкесінше сигнал спектріндегі жоғары және төменгі жиіліктер. Қазіргі уақытта өндірісте $\Delta f$ >500МГц сигналдар қолданылады. (1)-формулаға сәйкес, сигналдың процессинг коэффициенті (база, күрделілік) былайша анықталады:

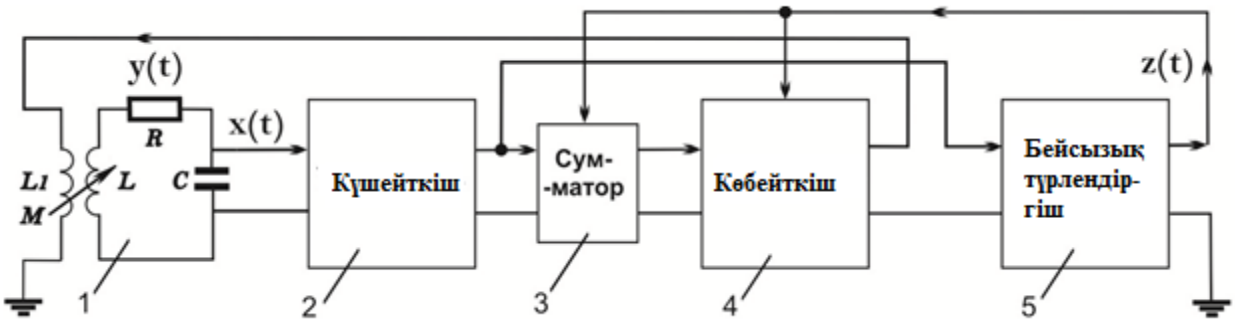
$$B = 2\Delta f T \ , \qquad (2)$$

мұндағы Т—импульс ұзақтығы.

Динамикалық хаос генераторы белгілі жиілік диапазонында бірқалыпты спектр тығыздығын алуға мүмкіндік береді. Хаосты сигналдар көздерінің энергетикалық эффективтілігі осымен тығыз байланысты. Шуыл диодтарымен салыстырғанда хаосты генераторлар аналогты шуыл тәріздес сигналдардың көзі болып табылады және олардан энергияны тұтыну тұрғысынан әлдеқайда эффективті (4-7 дәрежеге) болып табылады.

Хаосты сигналдардың тиімділігі антенналарға тәуелді емес: олардың бағытталған диаграммасында күйреу жоқ. Хаосты генераторлар әдетте қажет етілетін уақытқа қарағанда аз уақыт аралығында, яғни импульс ұзындығының 10%-дай уақытта синхрондалады.

Осы кезге дейін ғылымда әртүрлі радиотехникалық динамикалық хаос генераторлары жасалынған: Дмитриев-Кислов, Чуа, Анищенко-Астахов және т.б.генераторлары. Осы электрондық схемаларды дамыту барысында біз фазалық басқарылатын радиотехникалық динамикалық хаос генераторын жасадық [Жанабаев З.Ж., Тарасов С.Б. және т.б. Аса кеңжолақты динамикалық хаос сигналдарының генераторы. Инновациялық патент KZA423594, 2009,01]. Оның басқа хаосты генераторлардан айырмашылығы — оның өзқауым объектілердің қасиеттеріне ұқсас (фракталдық, ауысу, кеңжолақтық және т.б.) сигналдарды алуға мүмкіндік беруі. Бұл қасиеттер байланыс каналының энергетикалық (1битке сәйкес аз тұтыну), информациялық (жіберу қабілеттілігі), жиіліктік (кеңжолақтылығы) эффектілерін жақсартуға мүмкіндік береді.




1-Сурет. Фазалық басқарылатын динамикалық хаос генераторының блок схемасы. Селективті элемент (1) (тербелмелі контур), күшейткіш (2), сумматор (3), көбейткіш (4) және бейсызық түрлендіргішпен (5) кері байланысқан тізбек.

x(t), y(t), z(t) шамалар схеманың белгілі нүктелеріндегі кернеуге пропорционал. Бейсызық түрлендіргіш (2 арқылы) күшейтілген x(t) сигналды квадраттайды және түзетеді. $g = \frac{w}{w_0} > 1$ деп қабылданған, мұндағы $w_0$ – тербелмелі контурдың меншікті жиілігі, w – бейсызық түрлендіргіш релаксациясының уақытын сипаттайтын жиілік. Дәл осы шарт, яғни g>1 бейсызық түрлендіргіштің азинерциялық болуы x(t) және z(t) арасындағы фазалар айырымының жиналуына алып келеді, бұл өз кезегінде амплитудалары бірмәнді емес бейсызық резонансқа, яғни хаосқа алып келеді.

Сумматор кері байланыстағы y(t) сигналының қалыптасуында x(t) және z(t) сигналдарының өзара фазалар айырымын есепке алуды жүзеге асырады. Осындай жолмен табиғатта (нейрон динамикасында, сейсмологияда, астрофизикада және т.б.)

жиі кездесетін «жинақталу – серпілу» (bursting) типті хаосты тербелістер алуға болады.

Кирхгоф заңынан тербелмелі контурдағы I ток күші үшін мынадай теңдеу алуға болады:

$$\frac{dI}{dt}+\frac{R}{L}I+\frac{1}{LC}\int\left(I-MG\frac{d(I+i_3)}{dt}\right)dt=0\ , \qquad (3)$$

мұндағы L,R,C — тербелмелі контурдың индуктивтілігі, кедергісі, сыйымдылығы, M — өздік индуктивтілік және G — кері байланыс тізбегіндегі күшейткіштің тіктігі, $i_3$ - бейсызық түрлендіргіш арқылы өтетін ток. Күшейткіш арқылы өтетін ток:

$$i_2=-MG\frac{d(I+i_3)}{dt'}\ . \qquad (4)$$

Мынадай белгілеулер енгіземіз:

$$w_0^2=\frac{1}{LC} \qquad \tau=w_0t \quad \dot{x}=\frac{dx}{dt} \qquad x=\frac{I}{w_0} \qquad y=-\int x d\tau\,.$$

Бұдан кейін (3) теңдеу мынадай түрде жазылады:

$$\dot{x}=-\frac{R}{w_0L_0}x+y+MG(w_0x+i_3), \qquad (5)$$

$$\dot{y}=-x \qquad (6)$$

Күшейткіштің тіктігін мына түрде аламыз:

$$G=G_0-V, \qquad \dot{V}=f(x)-gV\ . \qquad (7)$$

Тербеліс сипаттамасына фазалар айырымының $\varphi=\varphi(x)-\varphi(z)$ әсерін ескеру үшін, оның тербелмелі контурдың меншікті жиілігінің өзгеруімен байланысты екендігін ескеру қажет, себебі, жиілік фазаның уақыт бойынша өзгеруімен анықталады. Изохрондылық ($w_0$-дің тербеліс амплитудасына тәуелділігі) бейсызық жүйенің негізгі қасиеті болып табылады. Жоғарыдағы (3) теңдеуден $w_0$ –дің жүйенің параметрлерімен ең қарапайым байланысы интеграл астындағы бірінші мүшеде бар екенін көруге болады. Сондықтан модуляцияның ең қарапайым мына түрін аламыз:

$$LC\ \rightarrow\ LC(1+Asin\varphi), \qquad y\ \rightarrow\ \frac{y}{(1+sin\varphi)}. \qquad (8)$$

Біз, шын мәнінде, Адлер теңдеуінің мына түрін қабылдадық:

$w_0 \rightarrow w = \dot{\varphi}, \quad \dot{\varphi} = w_0(1 + Asin\varphi)$ (9)

(5)-(9) формулалардан келесі теңдеулер жүйесі шығады:

$$\dot{x} = \left( MG_0 w_0 - \frac{R}{w_0 L} \frac{x}{x + \frac{i_3}{w_0}} \right) \left( x + \frac{i_3}{w_0} \right) - MV\left(w_0 x + i_3\right) + \frac{y}{\left(1 + A\sin\varphi\right)}, \tag{10}$$

$$\dot{y} = -x$$

$$\dot{V} = f(x) - gV$$

Белгілеулер енгізейік:

$$\frac{i_3}{w_0} = \mu z, \qquad MG_0 w_0 - \frac{Rx}{L_0(w_0 x + i_3)} = m, \quad MVw_0 = z, \quad Mw_0 f(x) = gx^2 I(x); \tag{11}$$

$$I(x) = 1, \ x > 0, \ I(x) = 0, \ x < 0,$$

мұндағы қабылданған шарт

$$Rx = const \cdot L_0(w_0 x + i_3) \tag{12}$$

жүйедегі сумматордың көмегімен орындалады. Осыдан кейін (10) теңдеуді мына түрде жазамыз:

$$\dot{x} = (m - z)(x + \mu z) + y\left(1 + A\sin\varphi\right),$$

$$\dot{y} = -x, \tag{13}$$

$$\dot{z} = g(x^2 I(x) - z).$$

$m$, $\mu$, $g$ параметрлері мағынасы бойынша селективті элементтің, бейсызық түрлендіргіштің тогының күшеюін және бейсызық түрлендіргіштің релаксациялық процестерінің салыстырмалы жиілігін анықтайды.

$\varphi(\tau)$ фазалар айырымын бейсызық резонанс шартынан іздейміз:

$$mw + ng = \pm g \tag{14}$$

мұндағы $m$, $n$ - нақты сандар, $w = w(x)$. Біз (14) формуланың сол жағын $\dot{\varphi}(\tau)$ арқылы белгілесек, онда автономды емес жүйені аламыз, себебі, $\varphi(\tau) = \pm g\tau$ деп жазуға

болады. Жүйенің автономды режимде жұмыс істеуін сипаттау үшін $\dot{\varphi}(\tau)$-ны $x$ арқылы модельдеу қажет. Жүйелерде хаос пайда болуы үшін (14) формуладағы таңбалардың өзгеруі қажет. Бұл шарт динамикалық хаос туралы әдебиеттерде Чириков шарты деп аталады. Сондықтан (14) формуланы мына түрде жазуға болады:

$$\dot{\varphi} = g \cdot Sign(x) \ . \qquad (15)$$

Сонымен, іздеп отырған теңдеулер жүйесі мына түрге келеді:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (m - z)(x + \mu z) + y / (1 + A\sin\varphi), \\ \dot{y} &= -x, \\ \dot{z} &= g(x^2 I(x) - z), \\ \dot{\varphi} &= g \cdot Sign(x). \end{aligned} \qquad (16)$$

(16) жүйе $\mu = 0$ $\varphi = 0$ кезінде радиофизикада белгілі $x^3$-ке пропорционал инерциялық бейсызықтылықты ескеретін Анищенко-Астахов теңдеулер жүйесіне айналады.

(16) жүйеден $m$, $\mu$, $g$, А параметрлерінің мәндерін өзгертіп, алмасу қасиеті бар, базасы үлкен, кеңжолақты хаосты сигналдарды алуға болады.

**Өзіндік жұмыс тақырыптары.**

1. Анищенко-Астаховтың динамикалық хаос генераторы.
2. Чуа схемасы бойынша хаос генераторы.
3. Фазалық басқарылатын динамикалық хаос генераторы теңдеуін қорыту.

**Әдебиеттер**

[1,9,10]