

УДК 537.86/87:530.182

З. Ж. ЖАҢАБАЕВ, Е. Д. НӘЛБАЕВ, А. А. ТЕМІРБАЕВ

(Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан)

## ТҰТАС БАЙЛАНЫСҚАН ЭЛЕКТРОНДЫҚ ОСЦИЛЛЯТОРЛАР АНСАМБЛІНЕ ШУЫЛ СИГНАЛЫНЫҢ ӘСЕРІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

**Аннотация.** Жұмыста тұтас байланысқан электрондық осцилляторлар ансамблінің динамикасына аналогтық электрондық шуыл генераторы сигналының әсерін зерттеуге арналған эксперименттік қондырғы пайдаланылған. Кері байланыс тізбегінде сызықты фаза ығыстырғыштың көмегімен тұтас байланысқан ансамбльге сумматор арқылы шуыл сигналы қосылған. Шуыл сигналының әсері бар ансамбльдің динамикасы тәжірибе жүзінде зерттелді. Сызықты тұтас кері байланысқан 72 электрондық осцилляторлардың синхрондалу шекарасына сыртқы шуыл сигналының әсері эксперимент түрінде зерттелді. Синхрондалу өткелін сипаттайтын Курамото үлгісі және реттеуші параметрдің шуыл сигналының орташа квадраттық мәніне тәуелділігі тәжірибеде зерттелді.

**Тірек сөздер:** синхрондалу, шуыл генераторы, осцилляторлар ансамблі, тұтас байланыс, фаза ығысуы, Курамото үлгісі.

**Ключевые слова:** синхронизация, генератор шума, ансамбль осцилляторов, глобальная связь, сдвиг фазы, модель Курамото.

**Keywords:** synchronization, noise generator, an ensemble of oscillators, global coupling, phase shift, the Kuramoto model.

**Кіріспе.** Тұтас байланысқан осцилляторлар ансамблінің динамикасына арналған бірнеше теориялық және эксперименттік зерттеулер бар [1-3]. Бұл жұмыстарда ансамбльдегі осцилляторлар динамикасының коллективті синхрондалуы және квазипериодты өзқауым күйіне түсуі туралы маңызды эффектілер байқалған. Сондай-ақ, жүйе бейсызық байланысқан жағдайда ортақ өрістің жиілігі ансамбльдегі осцилляторлардың жиілігінен өзгеше болатын ерекше квазипериодты өзқауым күйі (КӨК) қарастырылған. Бұл құбылысты осы жұмыстың авторларының эксперименттік зерттеулермен дәлелдеуі әлемдік ғылыми ортада үлкен қызығушылық тудырды.

Кез келген электронды жүйелерді құраушы элементтерде кернеудің немесе токтың кездейсоқ флуктуациялары болады. Әдетте мұндай флуктуациялар шуыл түрінде болады және телекоммуникациялық және электрондық жүйелерде зиянды фактор ретінде саналады. Бірақ шуыл әрқашанда зиян емес. Жүйеде шуыл болған кезде оны жүйенің өзінің электрлік сипаттамасын өзгертуге қажет фактор ретінде қолдануға болады. Соңғы зерттеулер шуылдың физикалық [4-7], физиологиялық [8], химиялық [9] және басқа да жүйелерде конструктивті роль атқаратындығын көрсетті. Сондай-ақ, аз еркіндік дәрежелі хаосты сигналдың көмегімен ақпаратты тасымалдауда, кез келген телекоммуникациялық байланыста шуыл сигналы жаңа динамикалық күйдің пайда болуына алып келуі мүмкін.

Осы себептерден қазіргі уақытта динамикалық жүйеге шуылдың әсерін зерттеу маңызды болып табылады. Шуыл сигналы әсер ету кезіндегі ансамбль динамикасының өзгерісі туралы теориялық зерттеулер жасалынған [10, 11]. Зерттеу шуыл қарқындылығы әсерінен ансамбль динамикасының синхрондалуында Ляпунов көрсеткіші әрқашан теріс болатыны көрсетілген. Ал шуыл қарқындылығының үлкен мәндерінде синхронды тәртіп болмайды және оң мәнді Ляпунов көрсеткіші пайда болады. Бұл жүйенің асинхронды күйін береді. Бұл бағытта эксперименттік зерттеу жасалынбаған. Біз шуыл сигналы әсер еткенде тұтас байланысқан осцилляторлар ансамблінің коллективті динамикасын эксперименттік зерттеуді қарастырамыз.

Ансамбльдегі элементтердің барлығының коллективті синхрондалуы, ортақ өрістің пайда болуы – тұтас байланыстың негізгі эффекті екендігі белгілі және ансамбльдегі осцилляторлардың коллективті синхрондалуы реттеуші параметрмен көрсетіледі.

Мақала авторларының өзге эксперименттік зерттеу еңбектерінде ортақ өрістің байланыс күші және фаза ығысуына тәуелділігі қарастырылған [1-3]. Ал шуыл сигналы әсер еткендегі коллективті синхрондалу режимінің шекарасының өзгеретіндігін эксперименттік зерттеу осы жұмыстың мақсаты болып табылады.

**Шуыл әсерінен тұтас байланысқан осцилляторлар ансамблінің синхрондалуы.** Тұтас байланысқан осцилляторлар ансамблінің синхрондалуының теориялық негізі белгілі. Ал енді шуыл сигналының осындай динамикалық жүйеге әсеріне тоқталайық.

Жалпы стохасты процестер теориясында шуыл сигналының уақыт бойынша өзгерісін орташалап қарастыру кеңінен қолданылады. Осы әдістің негізінде шуыл сигналының табиғатын түсіндіру Ляпунов көрсеткішін есептеумен тікелей байланысты. Ляпунов көрсеткіші шуыл пайда болған кезде жүйе троекториясының біршама қозуының эволюциясын түсіндіреді. Яғни, шуылдың қозуын емес, жүйе күйінің қозғандағы орнықтылықтан ауытқиды.

Периодты автотербелмелі жүйеге шуыл әсер ету кезіндегі негізгі эффект фазалар диффузиясының пайда болуы болып табылады. Бұл кезде автотербелістер идеалды емес болады. Кейде шуыл реттеуші роль атқарады, автотербелмелі жүйелерді синхрондайды. Егер екі бірдей немесе аз ғана ерекшеленетін автотербелмелі жүйеге шуылмен әсер етсек, онда олар осы шуылдың әсерінен синхрондалуы мүмкін. Бұл құбылыс максималы Ляпунов көрсеткішінің мәнімен сипатталады. Автономды жүйе үшін ол ноль болады. Шуыл әсер еткенде Ляпунов көрсеткіші теріс мәнге ие болады және ол синхрондалуды сипаттайды.

$N$  тұтас байланысқан осцилляторлар ансамблін қарапайым синустық түрде байланысқан осцилляторлардың Курамото-Сакагучи үлгісімен [13] сипаттайды:

$$\dot{\varphi}_k = \omega_k + \varepsilon R \sin(\theta - \varphi_k + \alpha), \quad k=1, \dots, N, \quad (1)$$

Бұл формуладағы  $\varphi_k$  және  $\omega_k$  – осцилляторлардың фазалары және меншікті жиіліктері,  $\varepsilon$  – тұтас байланысқан осцилляторлардың байланыс күшін сипаттайды.  $R$  және  $\theta$  сәйкесінше ортақ өрістің амплитудасы және фазасы.  $R$  амплитуданы реттеуші параметр деп те атайды. Бұл екі шама келесі түрде анықталады:

$$R e^{i\theta} = N^{-1} \sum_k e^{i\varphi_k}. \quad (2)$$

(1)-формуладағы  $\alpha$  параметрі осцилляторлар арасындағы фаза айырымын сипаттайды. Енді осы жүйеге шуыл сигналының әсерін қарастырсақ:

$$\dot{\varphi}_k = \omega_k + \varepsilon R \sin(\theta - \varphi_k + \alpha) + \xi(t), \quad (3)$$

мұндағы  $\xi(t)$  – дельта-функция түрінде корреляцияланған гаусс немесе ақ шуыл қарқындылығы. Біз  $\xi(t)$  шуыл сигналының ансамбльге әсерін тәжірибе жүзінде зерттейміз.

**Эксперименттік қондырғы.** Біз өзге ғылыми жұмыстарымызда электрондық осцилляторлар ансамблінің электронды қондырғысы туралы айтып өткенбіз [1]. Бұл жұмыста да біз ансамбльдегі осцилляторлар ретінде периодты сигнал беретін Вин көпірі бар генераторды қолданамыз. Вин көпірі генераторының сұлбасы және әрбір құраушы элементінің қызметі [1]-жұмыста толық қарастырылған. Ансамбльдегі барлық осцилляторлардың жиіліктері  $\approx 1,1$  кГц жиілікке жақын болады. Байланыс жоқ кезіндегі барлық жеке осцилляторлардың амплитудасы шамамен  $V \approx 1$  В болып жасалынды.

$R_C$  жүктеме резисторы арқылы тұтас байланысқан ансамбльдің кері бағытта сызықты фазаығыстырғышқа  $V_C = \varepsilon V_L$  кернеу сигналы келіп түседі (1-сурет). Кернеудің  $C$ ,  $L$  көрсеткіштері әдеттегі сыйымдылық пен индуктивтіліктің белгілеуіне қатысты емес. Бұл көрсеткіштер кернеулердің ағылшын тіліндегі мағыналарына сәйкес алынған. Мысалы,  $C$  көрсеткіші “coupling” – байланыс деген сөзді білдіреді. Мұндағы  $\varepsilon$  параметрі  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  аралығында өзгеретін тұтас байланыс күшін сипаттайды, ал  $V_L$  – жүктеме резистордың кірісіндегі кернеу сигналы. Егер  $V_L = IR_C$  десек, онда  $V_C$  ны былайша жазуға болады:

$$V_C = \varepsilon IR_C. \quad (4)$$

Бұдан

$$I = \frac{V_C}{\varepsilon R_C} \quad (5)$$

Генератордың шығыс нүктесіндегі кернеу Кирхгофтың II заңы бойынша мынаған тең болады:

$$V_i = V_{R_{out}} + V_{R_C} + V_C \quad (6)$$

Осыдан  $V_C$ -ны тапсақ:

$$V_C = V_i - V_{R_{out}} - V_{R_C}, \quad (7)$$

мұндағы  $V_i$  – генератордың шығыс кернеуі;  $V_{R_{out}} = IR_{out}$  – генератор шығысындағы  $R_{out}$  кедергісіне түскен кернеу;  $V_{R_C} = I(1 - \varepsilon)R_C$  –  $V_C$  байланысты реттеуші жүктеме резистордың бөлігіне түскен кернеу.

Сонымен (7)-теңдеуді ашып жазсақ, мынадай теңдеуді аламыз:

$$V_C = V_i - IR_{out} - I(1 - \varepsilon)R_C \quad (8)$$

$$V_i - V_C = IR_{out} + I(1 - \varepsilon)R_C \quad (9)$$

Енді (9)-ды  $N$  тізбек үшін жазайық:

$$\sum_{i=1}^N V_i - NV_C = R_{out} \sum_{i=1}^N I_i + NI(1 - \varepsilon)R_C \quad (10)$$

(10)-теңдеуге (4)-ті қоямыз:

$$\sum_{i=1}^N V_i = R_{out} \sum_{i=1}^N I_i + NI R_C \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N I_i = I \quad (12)$$

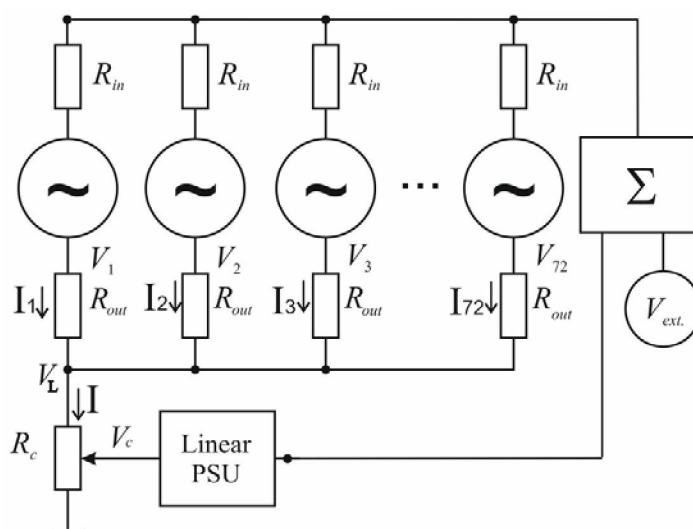
(11)-ге (5)-ті қойсақ:

$$\sum_{i=1}^N V_i = \frac{V_C}{\varepsilon R_C} (R_{out} + NR_C) \quad (13)$$

(13)-теңдіктің оң жақ бөлігін  $R_C$ -ға бөліп,  $V_C$ -ны былайша жазуымызға болады:

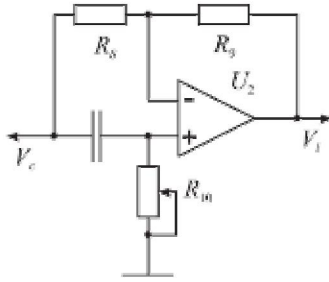
$$V_C = \varepsilon \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N + R_{out}/R_C} \quad (14)$$

Мұндағы  $V_i$  –  $i$ -ші осциллятордың шығыс кернеуі.  $R_{out} \ll NR_C$  болса, онда  $V_C \sim \Sigma V_i$ , яғни ортақ өріс түріндегі байланыс бар болады.



1-сурет – Тұтас байланысқан осцилляторлардың сұлбасы. Әрбір генератор жеке символмен көрсетілген. Сызықты фазаығыстырғыштың сұлбасы 2-суретте берілген. Кері байланыстың күші  $R_C$  потенциометрмен басқарылады

Сызықты фазаығыстырғыштан шыққан сигнал сумматорда шуыл сигналымен қосылады да, қосылған сигнал кері бағытта  $R_m$  резистор арқылы осцилляторлардың әрқайсысына беріледі.



2-сурет – Сызықты фазығыстырғыштың сұлбасы

Фазығыстырғыштың сызықты бөлігі сигналдың фазасын ығыстыратын, бірақ өзінің амплитудасын өзгертпейтін белсенді жиіліктік фильтр болып табылады. Фаза ығысуы 2-суретте көрсетілген  $R_{10}$  резисторының көмегімен басқарылады. Фазығыстырғыш кірісіне кірген сигнал шығысында уақыт бойынша кешігіп шығады.

Сигналдың фазасын анықтау әдісі аналитикалық сигналдарды талдау теориясынан белгілі. Бұл әдіс  $S(t)$  сигналды Гильберт түрлендіруі арқылы өрнектейді:

$$S(t) = s(t) + i s_H(t) = A(t) e^{i\varphi(t)}. \quad (15)$$

Мұндағы  $s_H(t)$  функциясы  $s(t)$  -ның Гильберт түрлендіруі:

$$s_H(t) = \pi^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau. \quad (16)$$

Сигналдың меншікті сипаттамаларын есептеу кезінде оның барлық уақыт интервалын білуіміз қажет. Яғни, Гильберт түрлендіруі уақыт бойынша локалды емес.

$s(t) = A \cos(\omega t)$  гармониялық тербелісін кешенді түрінде жаза аламыз:

$$S(t) = A \cos(\omega t) + i A \sin(\omega t) \quad (17)$$

Бұл тербелістің фазасы  $\pi/2$ -ге ығысқан жорамал бөлігінің Гильберт түрлендіруімен байланысты екендігін көрсетеді. Гильберт түрлендіруі аналитикалық сигналдың әрбір спектрлік компонентін  $\pi/2$ -ге ығыстырады.

Сонымен, сигналдың меншікті фазасы былайша анықталады:

$$\varphi_i = \arctan \left( \frac{\hat{V}_i}{V_i} \right). \quad (18)$$

мұндағы  $\hat{V}_i$  шамасы –  $V_i$ -дің Гильберт түрлендіруі.

Сәйкесінше фазығыстырғыштың кіріс және шығыс фазалары былайша анықталады:

$$\varphi_{in} = \arctan \left( \frac{\hat{V}_{in}}{V_{in}} \right) \quad (19)$$

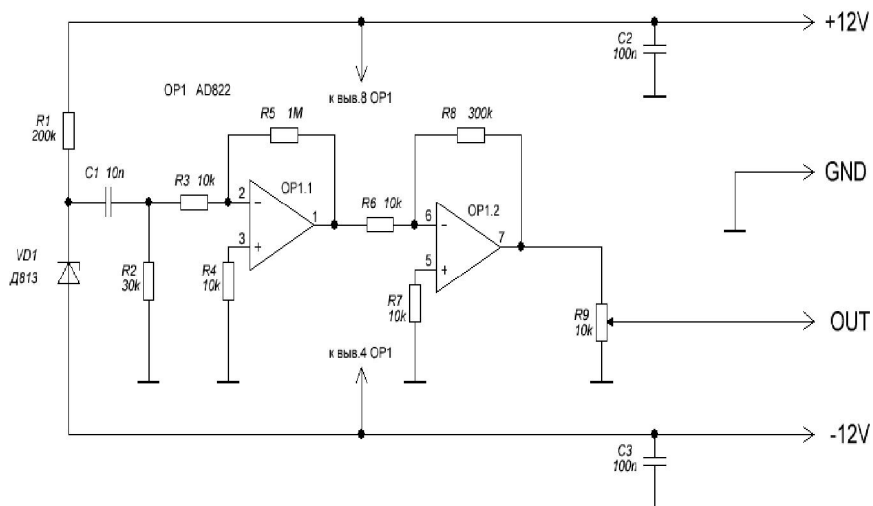
$$\varphi_{out} = \arctan \left( \frac{\hat{V}_{out}}{V_{out}} \right) \quad (20)$$

Сызықты фазығыстырғыштың  $\Delta\varphi$  шамасын есептеу мына формуламен анықталады:

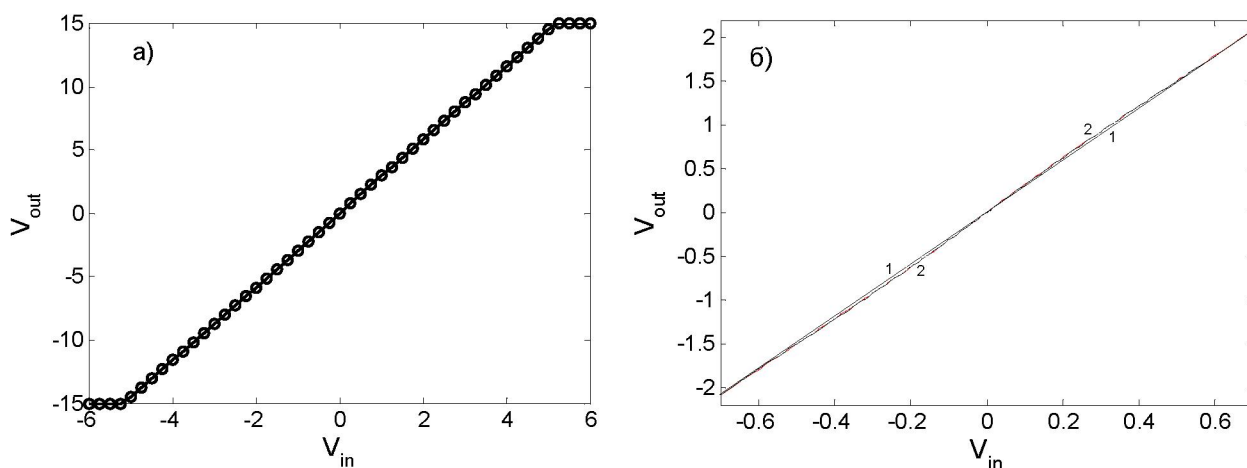
$$\Delta\varphi = \varphi_{out} - \varphi_{in}. \quad (21)$$

Шуыл сигналын шығаратын генератордың принциптік сұлбасы 3-суретте көрсетілген. Аналогтық электрондық шуыл генераторының принциптік сұлбасына тоқталайық. Генератор ОР1, ОР2 операциялық күшейткіштерден, VD1 Д813 стабилитроннан,  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$ , резисторлардан,  $C_1, C_2, C_3$  конденсаторлардан және  $R_9$  потенциометрден тұрады. Сапалы шуыл көзі ретінде VD1 (Д813) кремний стабилитроны қолданылған. Шала өткізгіштік стабилитронда кездесетін флуктуация жиілік диапазонының кез келген мәнінде спектр құраушылары бірқалыпты таралатын бытыралы шуыл болып табылады.

Стабилитроннан алынған шуыл сигналы ОР1 операциялық күшейткіші арқылы күшейтіледі. Одан кейін ОР2 инверттеуші операциялық күшейткішіне келіп түседі. Шуыл сигналының амплитудасы  $R_9$  потенциометрі көмегімен реттеледі. Генератор  $\pm 12V$  қорек көзімен қоректенеді. Операциялық күшейткіш ретінде AD822AN элементі алынды. Эксперименттен алынған операциялық күшейткіштің кіріс және шығыс сипаттамалары және оның аргументінің аз интервалы үшін түрі 4-суретте көрсетілген. Бұл сипаттамалар NI ELVIS платформасының көмегімен күшейткіштің кірісіне синусоидалық сигнал бере отырып зерттелінді.



3-сурет – Шуыл генераторының принциптік сұлбасы



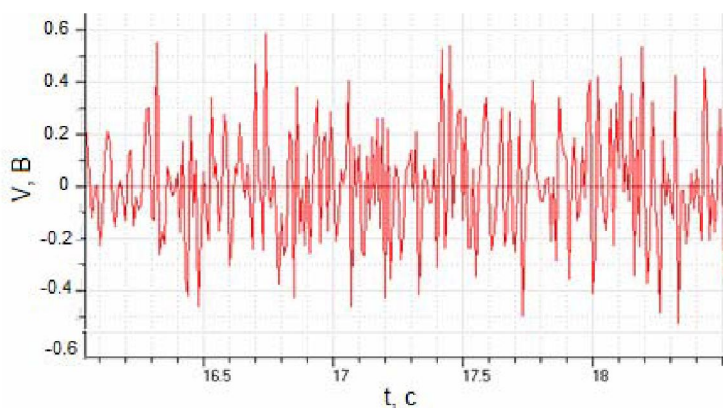
4-сурет – AD822AN операциялық күшейткішінің кіріс және шығыс сипаттамаларының эксперименттік нәтижесі (а), аз интервал үшін нәтиже және оның аппроксимациясы (б), 1 – түзу сызық, 2 – эксперимент және аппроксимация

4а-суреттен AD822AN операциялық күшейткішінің кіріс және шығыс сипаттамаларының эксперименттік нәтижесі сызықты екендігін көреміз. Ал шын мәнінде, дәлірек өлшегенде сипаттама сызықты болмауы мүмкін. Сондықтан сипаттаманы аз интервал үшін қарастырамыз (4б-сурет).  $V_{in}$  кіріс кернеуінің аз диапазоны үшін сипаттама бесінші ретті көпмүшемен жақсы аппроксимацияланады:

$$V_a = f(V_{in}) = a_1 V_{in} - a_3 V_{in}^3 + a_5 V_{in}^5 \quad (22)$$

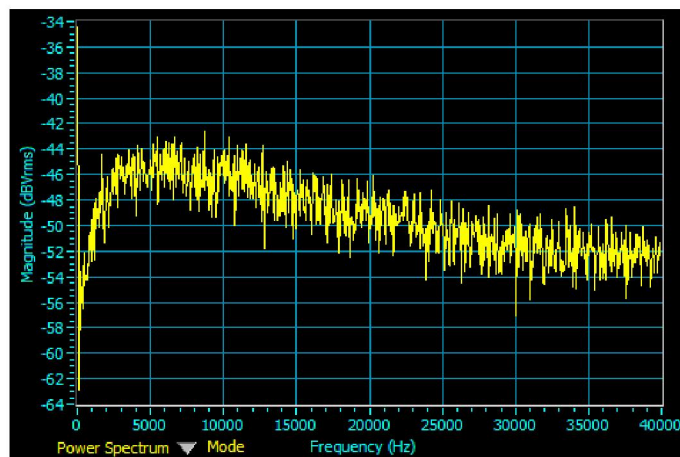
Мұндағы  $a_1=3.1557$ ,  $a_3=0.8072$  және  $a_5=0.95282$  шамаларын 4б-суретте қолдандық.

5-сурет – Максимальды амплитудасы  $\sim 0,5$  В жағдайдағы шуыл сигналының уақыт бойынша өзгерісі



Шуылдық сигналдың уақыт бойынша өзгеруін қарастырайық. Ең үлкен ауытқу шамамен  $\sim 0,5$  В жағдайдағы шуыл сигналының уақыт бойынша өзгерісі 5-суретте көрсетілген. Формасына қарап сигналдың кездейсоқ екендігін айта аламыз, ол шуыл сигналы болып табылады.

NI ELVIS платформасының көмегімен шуыл сигналының спектрін бақыладық. 6-суреттен көріп отырғанымыздай сигналдың максималь жиілігі шамамен 40 кГц болады. Ақ шуыл сигналының жиіліктің кез келген диапазонында спектрлік құраушысы бірқалыпты таралатын қасиетін ескерсек, сигналды жуықтап ақ шуыл деп қабылдауға болады.



6-сурет – Шуыл сигналының спектрі

OP1 және OP2 инверттеуші операциялық күшейткіштері стабилитроннан алынған әлсіз сигналдың амплитудасын бірнеше ондаған вольтқа дейін күшейтеді. Инверттеуші күшейткіштің күшейту коэффициенті:

$$K_u = \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (23)$$

Сәйкесінше әрбір күшейткіш сигналдың амплитудасын  $K_u$  есе арттырады:

$$\begin{cases} K_{u1} = -\frac{R_5}{R_2} = \frac{1M\Omega}{10k\Omega} = 100 \\ K_{u2} = -\frac{R_8}{R_6} = \frac{300k\Omega}{10k\Omega} = 30 \end{cases} \quad (24)$$

$$K_u = K_{u1} \cdot K_{u2} = 3000 \quad (25)$$

Біздің генераторымыз шуыл көзіндегі сигналды 3000 еседей күшейте отырып, шамамен амплитудасы  $\sim 10$ В-қа дейін сигнал бере алады. Шуыл сигналы амплитудасының орташа квадраттық мәні:

$$\delta = \sqrt{\langle (V - V_0)^2 \rangle} \quad (26)$$

Біз генераторды NI ELVIS платформасының көмегімен қоректендірдік және сандық талдау жасау үшін осы платформаның аналогты-санды түрлендіргіші (АСТ) көмегімен сигналды персоналды компьютерде (ПК) жаздық. Сигналды жазу үшін LabVIEW 2010 компьютерлік бағдарламасы пайдаланылды.

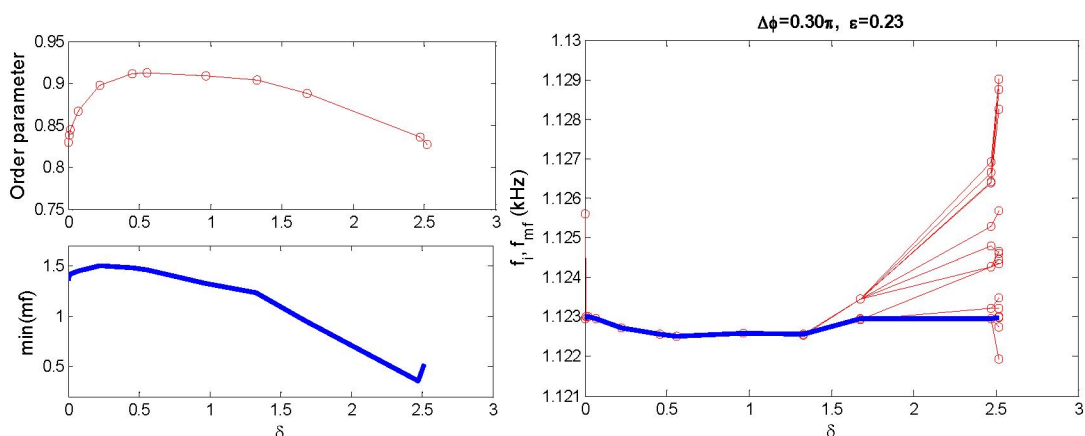
Осындай әдіспен  $\varepsilon$  байланыс күшінің аз мәні үшін және  $\Delta\varphi$  сызықты фазаығысудың әртүрлі мәндері үшін ансамбль динамикасының шуыл сигналының амплитудасының орташа квадраттық мәніне тәуелділігін эксперименттік түрде зерттедік.

**Эксперимент нәтижелері.** Тұтас байланыс  $\varepsilon$  күшін тұрақты етіп  $\Delta\varphi$  фаза ығысуының түрлі мәндерінде шуылдың орташа квадраттық мәнін арттыру арқылы толық синхрондалу құбылысын байқауға болады. Синхрондалу күйінде ансамбльдегі барлық осцилляторлардың жиіліктері мен ортақ өрістің жиілігінің шамасы бірдей мәнге ұмтылады.

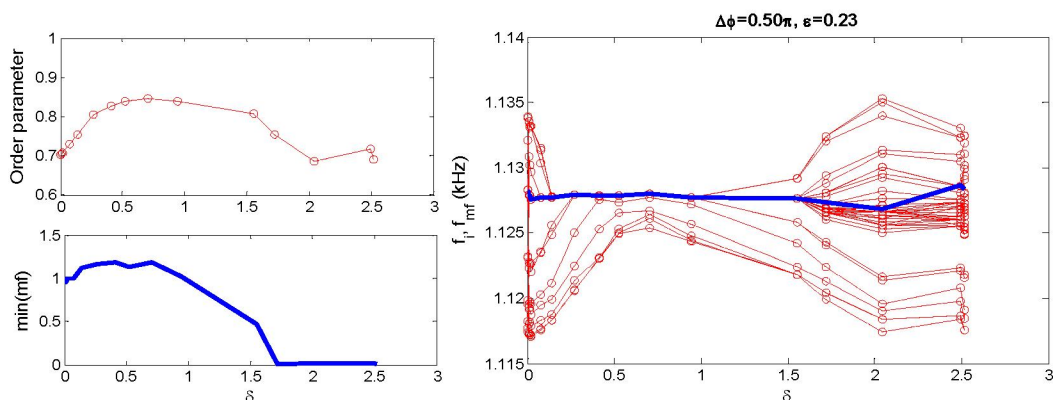
Біз экспериментте сызықты фаза ығысу, тұтас байланыс күші және шуыл сигналының амплитудасы параметрлерін өзгерттік. Әрбір параметрдің өзгерісі үшін біз барлық  $N=72$  генератордың

шығыс  $V_i$  кернеулерін және  $R_C$  арқылы  $V_{mf}$  ортақ өрістің кернеуін жазып алдық. Дискретизация жиілігі  $f_s \approx 20$  кГц. Біз әрбір өлшеуді  $M = 5 \cdot 10^4$  нүктемен 5 реттен жазып алдық.

Байланыс күшінің  $\varepsilon = 0,23$  мәнін тұрақты ете отырып  $\Delta\phi$  фаза ығысуының әртүрлі мәндері үшін  $\delta$  шуыл сигналының орташа квадраттық мәнін өзгертумен ансамбльдегі осцилляторлардың динамикалық күйін бақыладық.  $\Delta\phi = 0,30\pi$  кезінде  $\delta$  шамасының өте төменгі мәнінен бастап барлық осцилляторлар синхронды күйде болады, ал  $\delta = 1,4$  мәнінен ары қарай артуымен синхрондалу бұзылып, асинхронды күйге өтетінін көреміз (7-сурет). Бірақ мұнда барлық осцилляторлар синхронды күйден шықпайды. Реттеуші параметрдің максимум мәнінен кейін монотонды түрде кемігенін көреміз.



7-сурет –Реттеуші параметрдің, минимальды амплитуданың және осцилляторлар мен ортақ өріс жиіліктерінің шуыл сигналының орташа квадраттық мәніне тәуелділігі. Мұнда  $\Delta\phi = 0,30\pi$  және  $\varepsilon = 0,23$

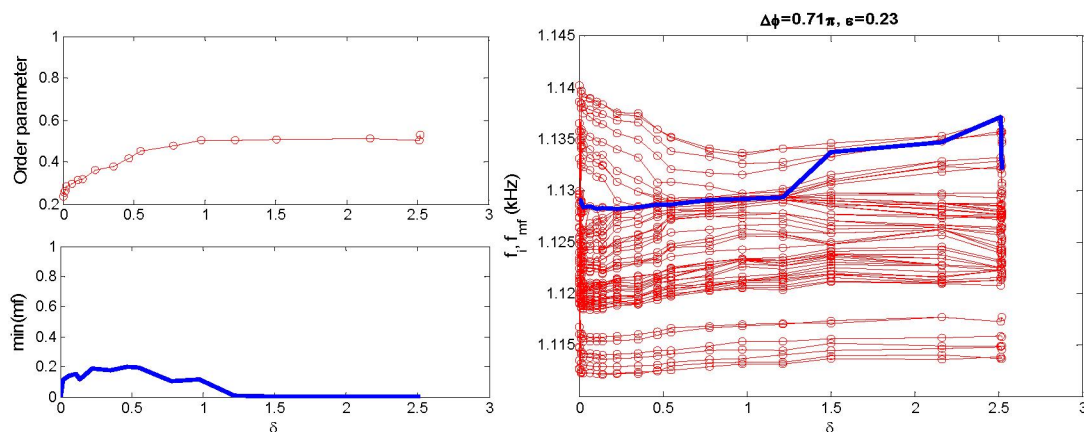


8-сурет. Реттеуші параметрдің, минимальды амплитуданың және осцилляторлар мен ортақ өріс жиіліктерінің шуыл сигналының орташа квадраттық мәніне тәуелділігі. Мұнда  $\Delta\phi = 0,50\pi$  және  $\varepsilon = 0,23$

Енді біз  $\varepsilon$ -байланыс күшін өзгертпей,  $\Delta\phi = 0,50\pi$  мәнінде шуыл сигналының ансамбльдің динамикасына әсерін қарастырайық. Нәтижесі 8-суретте көрсетілген. Суреттен көргеніміздей шуыл сигналы амплитудасының орташа квадратының кез келген мәнінде толық синхрондалу құбылысы байқалмайды. Бірақ графиктің аз бөлігінде шала синхрондалу құбылысының пайда болатындығын көре аламыз. Ал минимальды амплитуда  $\delta > 1,7$ -ден бастап нолдік деңгейге түседі. Реттеуші параметр де кемиді.

Сызықты фаза ығысудың мәнін  $\Delta\phi = 0,71\pi$ -ге ұлғайтқандағы ансамбльдегі осцилляторлардың динамикасы 9-суретте көрсетілген. Суреттен көріп отырғанымыздай сыртқы шуыл сигналының артуына қарай осцилляторлардың жиіліктері мен ортақ өрістің жиіліктері  $\delta$ -ның барлық мәнінде синхронды күйге ұмтылмайды және олар асинхронды күйде қалып қояды.

Эксперимент нәтижелеріне талдау жасай келе, ансамбльге шуыл сигналы әсер еткенде фаза ығысудың  $0 < \Delta\phi < 0,50$  аралығында синхрондалу байқалады деуге болады. Ал егер фаза ығысуы  $0,50 < \Delta\phi < 1$  аралығында болса, онда шуыл сигналы ансамбльдің динамикасын асинхронды күйге түсіруге ұмтылады деп айта аламыз.



9-сурет – Реттеуші параметрдің, минимальды амплитуданың және осцилляторлар мен ортақ өріс жиіліктерінің шуыл сигналының орташа квадраттық мәніне тәуелділігі. Мұнда  $\Delta\phi = 0,71\pi$  және  $\varepsilon = 0,23$

**Қорытынды.** Жұмыста тұтас байланысқан электрондық осцилляторлар ансамблінің динамикасына аналогтық электрондық шуыл генераторының сигналының әсерін зерттеуге арналған эксперимент баяндалған. Кері байланыс тізбегінде сызықты фаза ығыстырғыштың көмегімен тұтас байланысқан ансамбльге сумматор арқылы шуыл сигналы қосылған. Тұтас кері байланысқан 72 электрондық осцилляторлардың синхрондалу шекарасы сыртқы шуыл сигналының әсері оның мәніне байланысты эксперимент түрінде анықталды. Синхрондалу өткелін сипаттайтын Курамото үлгісі және реттеуші параметрдің шуыл сигналының орташа квадраттық мәніне тәуелділігі тәжірибеде зерттелді.

Эксперимент жүзінде ансамбль динамикасының шуыл сигналы амплитудасының орташа квадраттық мәніне байланысты шала синхрондалуы, толық синхрондалуы және оның бұзылуы көрсетілді.

Сонымен сыртқы шуыл тек ретсіздікке алып келмейді, белгілі жағдайларда тәртіп те тудырады.

#### ӘДЕБИЕТ

- 1 Temirbayev A.A., Nalibayev Y.D., Zhanabaev Z. Zh., Ponomarenko V.I., Rozenblum M. Autonomous and forced dynamics of oscillator ensembles with global nonlinear coupling: An experimental study //Phys.Rev.E.-2013.-Vol.87,-P.062917.
- 2 Temirbayev A., Zhanabaev Z., Tarasov S., Ponomarenko V., and Rosenblum M., Experiments on oscillator ensembles with global nonlinear coupling //Phys. Rev.E.-2012.-Vol.85,-P.015204.
- 3 Zhanabaev Z. Zh., Temirbayev A.A., Tarasov S.B., Nalibayev Y. D. Experimental study of an oscillator ensemble with global and nonlinear coupling //«Eurasian Physical Technical Journal. – 2012. –P.3-12.
- 4 Garcia-Ojalvo J., Sancho J.M. Noise in Spatially Extended Systems. N.Y.: Springer, 1999.
- 5 Zhou C.S., Kurths J., Allaria E. //Phys. Rev. E.-2003.-V.67, № 6. -P.066220.
- 6 Isaeva O.B., Kuznetsov S.P., Osbaldestin A.H. //Phys.Rev. E.-2004.-V.69, № 3.-P.036216.
- 7 Blackburn J.A., Grunbeck-Jensen N., Smith H.J. //Phys. Rev. Lett.-1995.-V.74. -P.908.
- 8 Neiman A., Russell D.F. //Phys. Rev. Lett.-2002.-V.88. -P.138103.
- 9 Kapral R., Showalter K. Chemical waves and patterns. Dordrecht: Kluwer, 1995.
- 10 Denis S. Goldobin, Arkady Pikovsky //Phys.Rev.E.-2005.-Vol.71,-P.045201.
- 11 Braun W., Pikovsky A., Matias M.A. and Colet P. Global dynamics of oscillator populations under common noise //EPL-2012.-Vol.99,-20006.
- 12 Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука. 1968. 660с.
- 13 Kuramoto Y. In International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics, edited by H. Araki.-Springer, Lecture Notes Phys., New York, 1975. V.39, p. 420.

#### REFERENCES

- 1 Temirbayev A.A., Nalibayev Y.D., Zhanabaev Z. Zh., Ponomarenko V.I., Rozenblum M. Autonomous and forced dynamics of oscillator ensembles with global nonlinear coupling: An experimental study. Phys.Rev.E. 2013. Vol.87, P.062917.
- 2 Temirbayev A., Zhanabaev Z., Tarasov S., Ponomarenko V., and Rosenblum M., Experiments on oscillator ensembles with global nonlinear coupling Phys. Rev.E. 2012. Vol.85, P.015204.
- 3 Zhanabaev Z. Zh., Temirbayev A.A., Tarasov S.B., Nalibayev Y. D. Experimental study of an oscillator ensemble with global and nonlinear coupling «Eurasian Physical Technical Journal. 2012. P.3-12.



- 4 Garcia-Ojalvo J., Sancho J.M. Noise in Spatially Extended Systems. N.Y.: Springer, 1999.
- 5 Zhou C.S., Kurths J., Allaria E. Phys. Rev. E. 2003. V.67, № 6. P.066220.
- 6 Isaeva O.B., Kuznetsov S.P., Osbaldestin A.H. Phys.Rev. E. 2004. V.69, № 3.P.036216.
- 7 Blackburn J.A., Grunbech-Jensen N., Smith H.J. Phys. Rev. Lett. 1995. V.74. P.908.
- 8 Neiman A., Russell D.F. Phys. Rev. Lett. 2002. V.88. P.138103.
- 9 Kapral R., Showalter K. Chemical waves and patterns. Dordrecht: Kluwer, 1995.
- 10 Denis S. Goldobin, Arkady Pikovsky Phys.Rev.E. 2005. Vol.71, P.045201.
- 11 Braun W., Pikovsky A., Matias M.A. and Colet P. Global dynamics of oscillator populations under common noise EPL 2012. Vol.99, 20006.
- 12 Malakhov A.N. Fluktuasy v avtokalebatelnik sistemax. M.: Nauka. 1968. 660 p.
- 13 Kuramoto Y. In International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics, edited by H. Araki. Springer, Lecture Notes Phys., New York, 1975. V.39, p. 420.

### Резюме

*З. Ж. Жанабаев, Е. Д. Налибаев, А. А. Темирбаев*

(Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан)

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМОВОГО СИГНАЛА НА АНСАМБЛЬ ГЛОБАЛЬНО СВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

В работе исследовано воздействие сигналов от аналогового шумового генератора на динамику глобально связанных электронных осцилляторов. В цепь обратной связи при помощи линейного фазовращателя через сумматор был добавлен шумовой сигнал. Экспериментально исследована динамика ансамбля в присутствии шумового сигнала. Экспериментально исследовано воздействие шума на порог синхронизации 72 электронных осцилляторов с глобальной и линейной связью. Построены зависимости параметра порядка от среднеквадратичного значения амплитуды шумового сигнала.

**Ключевые слова:** синхронизация, генератор шума, ансамбль осцилляторов, глобальная связь, сдвиг фазы, модель Курамото.

### Summary

*Z. Zh. Zhanabaev, E. D. Nalibayev, A. A. Temirbayev*

(Al-Farabi kazakh national university, Almaty, Kazakhstan)

#### INVESTIGATION OF INFLUENCE OF COMMON EXTERNAL NOISE ON AN ENSEMBLE OF GLOBALLY COUPLED ELECTRONIC OSCILLATORS

We experimentally study dynamics of ensemble of globally coupled electronic oscillators under common external noise. In the feedback circuit using the linear phase shifter by an adder, the noise signal has been added. Experimentally studied the dynamics of the ensemble in the presence of noise signal. Experimentally studied the effect of noise on the synchronization threshold of 72 electronic oscillators with global and linear coupling. We demonstrate the dependences of the order parameter of the rms amplitude of the noise signal depending on various means of phase shift and coupling parameter.

**Keywords:** Synchronization, noise generator, an ensemble of oscillators, global coupling, phase shift, the Kuramoto model.

*Поступила 14.01.2014 г.*