

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Ербакыт Клара

«Ганн диоды негізіндегі генераторлардың жұмысына, оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Алматы 2022

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі


 Е.Таштай

«24» 05 2022 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС


Тақырыбы «Ганн диоды негізіндегі генераторлардың жұмысына, оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу»

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Орындаған: 

К.Ербақыт

Пікір беруші
ҚазҰАЗУ, PhD докторы,
Энергия үнемдеу және
автоматика кафедрa меңгерушісі


«ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ АГРАРЛЫҚ
ЗЕРТТЕУ УНИВЕРСИТЕТІ» ҚБ
«IT - инновациялар, автоматтардың
«24» 05 2022 ж.
«Механизациялау» факультеті

Молдажанов А. К.

Ғылыми жетекші
ҚазҰТЗУ, PhD докторы,
ЭТжҒТ каф. қауымдастырылған
профессоры



Н.К. Смайлов

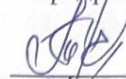
«24» 05 2022 ж.

Алматы 2022 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
Қ.И Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті
Автоматика және ақпараттық технологиялар институты
Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар кафедрасы
5В071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

БЕКІТЕМІН

Кафедра меңгерушісі



Е.Таштай

« 21 » Кі 2021ж

Дипломдық жұмыс орындауға ТАПСЫРМА

Білім алушы Ербақыт Клара

Тақырыбы «Ганн диоды негізіндегі генераторлардың жұмысына, оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу»

Университет ректорының “24” 12 2021ж. № 486-П бұйрығымен бекітілген
Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі «09» мамыр 2022 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

1) Байланыс желісінде Ганн диодын қолдану принциптері

2) Ганн диодындағы аса жоғары жиілікті құрылғылардың сипаттамалары

3) Аса жоғары жиілікті Ганн генераторлары

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) Аса жоғары жиілікті генераторларының синхрондалу процесстерін зерттеу жағдайын талдау

б) Сырттық синхрондау режиміндегі Ганн диодында генератор жұмысының математикалық моделін құру

в) Синхрондалған генератордың диэлектрикалық үлгілер формасындағы жүктеменің ганн диодындағы жұмысына әсерін зерттеу

г) Магнит өрісінің Ганн диодтарындағы генераторлардың сипаттамаларына әсері

д) Ганн диодындағы синхрондалған генераторға оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу.

Сызбалық материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс) :

Сызбалық материалдар 12 слайдпен көрсетілген

Ұсынылатын негізгі әдебиет :

1) Полупроводниковые приборы СВЧ. / Ю.М. Нойкин, Т.К. Нойкина, А.А. Усаев. М-во образования и науки Российской Федерации Федеральное гос. автономное образовательное учреждение высшего проф. образования "Южный федеральный ун-т", Физический фак. - Ростов-на-Дону : Южный федеральный ун-т, 2014..

2) Касаткин Л. В., Чайка В. Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. — Севастополь: Вебер, 2006. — 319 с.: ил.

3) Papageorgiou V. Cofabrication of Planar Gunn Diode and HEMT on InP Substrate/ V. Papageorgiou, A. Khalid, C. Li, D. R. S. Cumming // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2014. – Vol. 61. – №. 8. – P. 2779–2784.

4) В.Ю. Конев, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, В.П. Губанов, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев // Журнал технической физики, 2015, том 85, вып. 3

5) Вдовин В.А., Кулагин В.В., Митрофанов Е.В. и др. // Журн. радиоэлектрон. 2012. № 12. С. 1–15.

6) Конев В.Ю., Климов А.И., Ковальчук О.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 21. С. 45–51.


Дипломдық жұмысты (жоба) дайындау

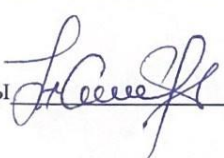
КЕСТЕСІ


Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Ганн диоды негізіндегі генераторларды талдау	24.01.2022	орындалды
Генераторлардың синхрондау процестерін зерттеу жағдайын үйрену	30.01.2022	орындалды
Ганн диодындағы генератор жұмысына сандық талдау жүргізу	01.03.2022	орындалды
Ганн диодындағы синхрондалған генератордың жұмыс режимдерін зерттеу	25.03.2022	орындалды
	20.04.2022	орындалды

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа (жоба) қойған

қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Норма бақылау	PhD докторы қауымдастырылған профессор Смайлов Нуржигит Куралбаевич	21.05.2022	

Ғылыми жетекшісі PhD докторы  Н.К.Смайлов
(қолы)

Тапсырманы орындауға алған білім алушы  К.Ербақыт
(қолы)

Күні 24 11 2022 ж.

АНДАТПА

Дипломдық жоба тақырыбы «Ганн диоды негізіндегі генераторлардың жұмысына, оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу».

Бұл дипломдық жұмыстың мақсаты аса жоғары жиілікті Ганн диоды негізіндегі генератордың синхрондау процестерін зерттеу болып табылады.

Ганн диодындағы генератордың құрамына кіретін элементтердің сызықты емес сипатын ескере отырып, тек бір тізбекті схемаларды қарастырумен ғана шектелінді және әртүрлі жеңілдететін болжамдар арқылы шешімдер қабылданды. Ганн диодындағы генератордың сұлбадық моделі MATLAB R2015B базасындағы Simulink графикалық және математикалық модельдеу ортасында зерттелді.

АННОТАЦИЯ

Тема дипломного проекта «Исследование влияния оптического излучения на работу генератора на диоде Ганна».

Целью данной дипломной работы является изучение процессов синхронизации генератора на основе высокочастотного диода Ганн.

Учитывая нелинейный характер элементов, входящих в состав генератора на диоде Ганна, ограничивались рассмотрением только одноцепных схем и принимались решения с помощью различных упрощающих предположений. Принципиальная модель генератора на диоде Ганн была исследована в среде графического и математического моделирования Simulink на базе MATLAB R2015B.

ANNOTATION

The topic of the diploma project «Investigation of the effect of optical radiation on the operation of the generator based on the Gunn diode».

The purpose of this thesis is to study the synchronization processes of a generator based on a high-frequency Gunn diode.

Taking into account the nonlinear nature of the elements that make up the generator on the Gunn diode, we limited ourselves to considering only single-chain circuits and made decisions using various simplifying assumptions. The principal model of the Gunn diode generator was studied in the Simulink graphical and mathematical modeling environment based on MATLAB R2015B.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	10
1 Қатты күйдегі АЖЖ генераторлардың синхрондау процестерін зерттеу жағдайын талдау	12
1.1 Ганн диоды	13
1.2 Ганн эффектісі	14
1.3 Ганн диодтарындағы АЖЖ-құрылғылардың сипаттамалары	16
1.4 Ганн диоды негізіндегі Генератор	17
1.5 Ганн диодтарының даму перспективалары	21
2 Сыртқы синхрондау режимінде ганн диодындағы генератордың жұмысын математикалық модельдеу	23
2.1 Ганн диодындағы синхрондалған генератор моделі	23
2.2 Математикалық модель негізінде Ганн диодындағы синхрондалған генератордың жұмыс режимдерін зерттеу	27
3 Генераторлық - түрлендіргіш құрылғылар мен олардың элементтерін эксперименттік зерттеу	33
3.1 Тербелістердің өсуін X жолақты Ганн генераторында эксперименттік бақылаулар	33
3.2 Генератордың теориялық-схемалық моделі	33
3.3 Сандық талдау	35
Қорытынды	41
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	43

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта кеңінен қолданылатын аспаптарға, жартылай өткізгіш АЖЖ генераторлардың белсенді элементтері ретінде қолданылатын биполярлы транзисторлар, Шотки тосқауылы бар өрістік транзисторлары(ШӨТ), көшкін-аралық диодтар (КАД) және Ганн диодтары (ГД) жатады. АЖЖ диапазондағы жартылай өткізгіш құрылғылардың артықшылығы олардың беріктігі, сенімділігі, төмен вольтты қуаты және кіші өлшемдері болып табылады. Бұл осы құрылғыларды АЖЖ жабдықтарда шағын және орта қуат күшейткіштерін, автоматты генераторларды, жиілік түрлендіргіштерін және басқа құрылғыларды жасау үшін кеңінен қолдануға жол ашады. Сонымен қатар, құрылғылардың бұл класында бірқатар кемшіліктер бар, олардың ішіндегі ең маңыздысы төмен жиілік тұрақтылығы, төмен шығыс қуаты және т.б.

Осы және басқа да бірқатар мәселелерді шешу үшін жартылай өткізгіш АЖЖ аспаптарды пайдалану, соңғы жылдары құрылғы деректерінің жұмысының аралас режимдеріне белсенді зерттеулер жүргізілуде. Өнімділікті жақсартудың ең тиімді әдістерінің бірі сыртқы синхрондау жүйелеріндегі белсенді элементтер ретінде қатты күйдегі АЖЖ генераторларды пайдалану болып табылады.

Жартылай өткізгіш АЖЖ генераторларды синхрондау жоғары жиіліктік тұрақтылығы бар және белсенді элементтің энергетикалық мүмкіндіктерін толық пайдалануға болатын құрылғылар жасауға мүмкіндік береді. Нәтижесінде сыртқы синхрондалған генератор белгіленген жиілік сигналын шығарып қана қоймай, сонымен қатар әр түрлі функцияларды орындайды. Олар: жиілікті түрлендіру, күшейту, жиіліктік және фазалық модуляциясы бар сигналдарды анықтау (детектрлеу). Сыртқы синхрондау жағдайында орналасқан өздігінен тербелмелі жүйеде өзара әрекеттесудің күрт сызықты емес сипатына, сондай-ақ әртүрлі сыртқы параметрлерді өзгерту арқылы осы жүйені басқарудың кең мүмкіндіктеріне байланысты, осы жүйенің шығу қуаты мен фазалық сипаттамалары синхрондалған генераторлар негізінде құрылғылардың жаңа кластарын құруға жол ашатын бірқатар маңызды сипаттамаларға ие. [1]

АЖЖ құрылғыларға қолданылатын синхрондау процестерін зерттеу жеткілікті түрде кең жүргізілді. Алайда, қолданыстағы жұмыстарда синхрондалған генераторларда (СГ) болып жатқан процестерді теориялық зерттеу бірқатар шектеулермен жүзеге асырылады. СГ-дың математикалық моделін құру кезінде төмен сигналдық жуықтауды қолдануды немесе болжауды ұсынылады, ал негізгі жиіліктен басқа гармоникалық компоненттер аз. Кеңінен қолданылатын әдіс концентрацияланған параметрлері бар схема түріндегі синхрондалған АЖЖ генератор және тиісті тендеулердің аналитикалық шешімі болып табылады. Алайда, осы схемаға кіретін элементтердің сызықтық емес сипатын ескере отырып, авторлар әдетте бір тізбекті схемаларды қарастырумен шектеледі және әртүрлі жеңілдететін болжамдар арқылы шешім қабылдайды. [2]

Дипломдық жұмыстың негізгі мақсаты - Ганн диодындағы генератор мысалында синхрондалған АЖЖ генератордың әртүрлі жұмыс режимдерін эксперименттік және теориялық зерттеу, оның ішінде зерттелетін жүйенің математикалық моделін құру, зерттелетін жүйеге оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу. Қойылған мақсатқа жету үшін Ганн диодтарындағы генераторларды зерттеудің теориялық әдістеріне сыни талдау жасалды, синхронизация режимінде жұмыс істейтін, Ганн диодында синхронизацияланған генератор (ГДСГ) моделі құрылды.

1 ҚАТТЫ КҮЙДЕГІ АЖЖ ГЕНЕРАТОРЛАРДЫҢ СИНХРОНДАУ ПРОЦЕСТЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖАҒДАЙЫН ТАЛДАУ

Автогенераторлардың синхрондау режимін зерттеуге ұзақ уақыт бойы жарияланған көптеген жұмыстар арналған. АЖЖ генератор құрылғыларының жаңа кластарының пайда болуы (вакуум, содан кейін жартылай өткізгіш) АЖЖ генераторлардың ерекшеліктерін ескере отырып, синхрондау процестерін зерттеуге арналған бірқатар жаңа зерттеулер мен жарияланымдарды тудырды. Жартылай өткізгіш АЖЖ генераторларды синхрондау процестеріне негізінен олардың белсенді элементтерінің сипаттамасымен байланысты бірқатар ерекшеліктер тән, мысалы, салыстырмалы түрде төмен сапа, белсенді элементтің қуат режиміне, АЖЖ тізбектің параметрлеріне және басқа факторларға байланысты сызықтық емес реактивтіліктің болуы болып табылады.

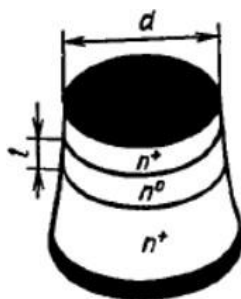
АЖЖ генераторларды синхрондау процестерін зерттеу сыртқы периодтық жүйенің қоздырушы күштері әсерінде динамикалық жүйелердің сызықтық емес теориясын дамыту үшін және де әр түрлі радиотехникалық функцияларды орындайтын АЖЖ-ті құрылғыларды практикалық іске асыру мүмкіндігін анықтауда үлкен қызығушылық тудырады. Синхрондау саласындағы зерттеулердің негізгі міндеті генераторлық жүйенің сипаттамаларын елеулі жақсарту, жиілік тұрақтылығын көтеру, жиілік спектріндегі қуатты қайта бөлу, жиілікті бөлу немесе көбейту болып есептеледі. Осы және басқа салаларда зерттеулер кеңінен жүргізілді. Алайда синхрондалған жартылай өткізгіш АЖЖ генератордағы процестерді кеңінен зерттеуге мүмкіндік беретін математикалық модель құру әлі де қиын. Бұл жағдай бірқатар жағдайларға байланысты. Синхрондалған генератордың (СГ) АЖЖ математикалық моделін құру электродинамикалық Максвелл заряд тасымалдаушыларының қозғалыс теңдеулерімен бірге белсенді элементтің жартылай өткізгіш құрылымдарының теңдеулерін шешу арқылы белсенді элементтегі физикалық процестерді талдау негізінде мүмкін болады. Мұндай тәсіл төмен сигналдық жуықтаумен бірге сәтті қолданылуы мүмкін, мысалы, жеке жоғары жиілікті Гана диодтарының сипаттамасы зерттеу үшін [20,21]. Алайда, нақты АЖЖ жүйелерді модельдеуге қолдануда бұл әдіс қазіргі уақытта машинаның үлкен шығындарымен байланысты және өте күрделі болып көрінеді.

АЖЖ СГ-дың сенімді сипаттамаларды алудың басқа қатаң әдісі шоғырланған параметрлері бар схема түріндегі АЖЖ құрылғының көрінісі және оны сипаттайтын теңдеулер жүйесінің кейінгі аналитикалық шешімі. Бұл тәсілді қолдану бастапқы дифференциалдық теңдеулердің күрделілігіне байланысты да қиын, өйткені АЖЖ схемаларға қатысты бұл теңдеулерде нақты жартылай өткізгіш құрылғылардың сипаттамаларын көрсететін күрделі сызықты емес тәуелділіктер бар. Жалпы алғанда, аналитикалық тәсіл сызықтық емес АЖЖ тізбектерді талдаудың қатаң әдісі болып табылады, бұл олардың

негізгі сипаттамаларын зерттеуге мүмкіндік береді және әрі қарай осы бөлімде егжей-тегжейлі қарастырылады.

1.1 Ганн диоды

Ганн диоды - бұл қарама-қарсы жағында екі омикалық байланысы бар электронды өткізгіштігі бар жартылай өткізгіш материалдың кристалы. Ганн диодының белсенді бөлігі әдетте $l=1-100$ мкм ұзындыққа ие және легирленген донорлық қоспалардың концентрациясы $N_0 = 2 \cdot 10^{14}-2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ тең. $N^+ = 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$ қоспаларының жоғары концентрациясы бар жартылай өткізгіштің қабаттары омық байланыстарды құруға қызмет етеді. 1.1-суретте Ганн диоды кристалы типтік құрылымы көрсетілген [3].

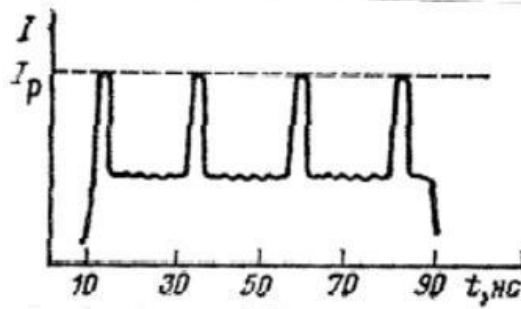


1.1 Сурет – «Сэндвич» типті Ганн диодының құрылымы [3]

1963 жылы Ган галлидің арсенидіне немесе n типті индийфосфидтің үлгісіне E_p белгілі бір шекті мәннен үлкен E_0 тұрақты электр өрісі қолданылса, онда сынамалар арқылы өтетін токтың өздігінен периодты тербелістері байқалатынын анықтады (сурет). 1.2). GaAs үшін E_p шекті өрісінің кернеуі шамамен 3 кВ/см, InP үшін – шамамен 6 кВ/см болды. T_0 тербеліс кезеңі шамамен электрондардың катодтан анодқа өту уақытына тең болды:

$$T_0 = \frac{1}{v_g} \quad (1.1)$$

мұнда l - үлгінің ұзындығы, v_g – электрондардың дрейфтік жылдамдығы (10^7 см/с – қа тең егер $E_0 = E_p$ болса).



1.2 Сурет - Ганндық үлгі арқылы өтетін токтың эксперименттік уақытқа тәуелділігі [3]

[3] - де төменде келтірілген Ганн эффектінің сипаттамасы келтірілген. $2 \cdot 10^{-3} \text{ см} < l < 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ Ганн қолданған үлгілер үшін тербеліс жиілігі АЖЖ-тер диапазонда жатты.

$E > E_p$ үлгісінде катодтан анодқа шамамен 10^7 см/с жылдамдықпен қозғалатын және анодта жоғалып кететін күшті электр өрісінің (домен) аймағы пайда болатыны белгілі болды. $E > E_p$ кезінде катодтан анодқа шамамен 10^7 см/с жылдамдықпен ауытқып, анодтың жанында жоғалып кететін күшті электр өрісі (домен) аймағы пайда болады. Бұл процесс периодты түрде қайталанады, сонымен қатар доменнің қалыптасуы кезінде ток азаяды, ал домен жоғалған кезде ол қайтадан шекті мәнге дейін өседі. 1963 жылы Ридли [2] домендік тұрақсыздық құбылыстарын жартылай өткізгіштің N-тәрізді вольт-амперлік сипаттамасында пайда болатындығын көрсетті. Біртекті үлгідегі ток тығыздығы

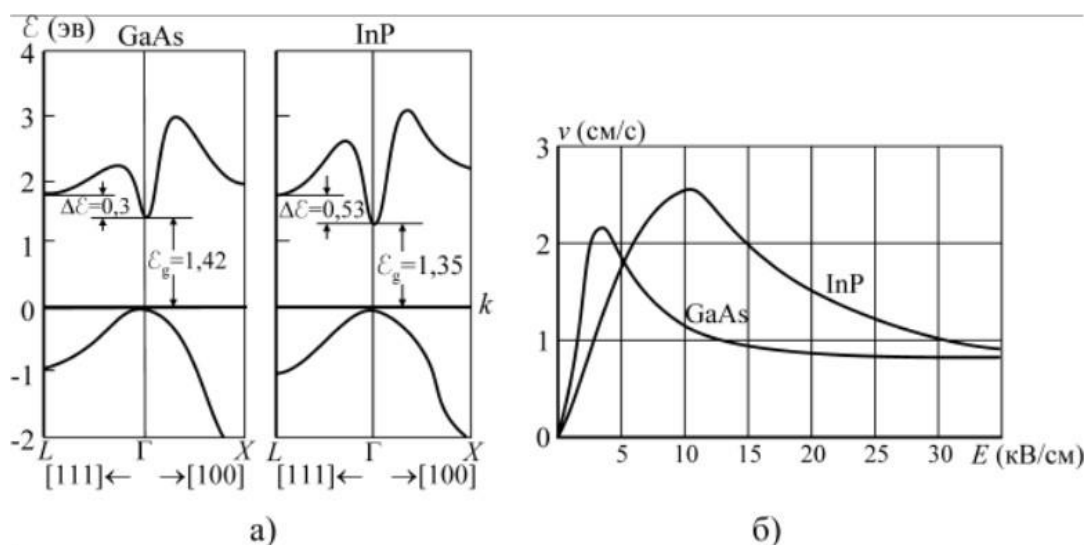
$$j = qn_0v, \quad (1.2)$$

мұнда q -электрон заряды, n_0 -тасымалдаушылардың шоғырлануы, v -тасымалдаушылардың орташа дрейфтік жылдамдығы. (1.2) формуласында егер өріс көбейген сайын тасымалдаушылардың концентрациясы немесе олардың дрейф жылдамдығы төмендесе ток тығыздығы электр өрісінің өсуімен төмендеуі мүмкін.

1.2 Ганн эффектісі

Ганн диодтарының - ГД (немесе жоларалық электронды тасымалдайтын диодтардың) жұмысы Ганн эффектісіне [1] негізделген, яғни жартылай өткізгіштерде (атап айтқанда, GaAs және InP) N – тәрізді v электрондық жылдамдықтың E электр кернеуіне тәуелділігінің яғни $v(E)$ -нің бар болуымен байланысты. Бұл құлаған аймақтың пайда болуы осы материалдардың аймақтық құрылымының ерекшелігімен байланысты. Идеалды жартылай өткізгіште электрондар бос бөлшектер ретінде қозғалатыны белгілі, бірақ оның массасы m_0 бос электронның массасына тең емес, бірақ электронның

энергиясының толқындық векторға тәуелділігімен анықталатын тиімді массасы бар. Бұл тиімді массаның мөлшері өз кезегінде материалдың аймақтық құрылымына байланысты. Қарапайым жағдайда (әсіресе кіші өрістерде) энергия толқын векторының квадратына пропорционал, ал тиімді массаны шартты түрде тұрақты шама деп қарастыруға болады. Алайда, көп жағдайда мұндай тәуелділік қатаң сақталмайды, ал кейбір құрылымдарда ол өте күрделі көрініске ие. 1а суретте GaAs және InP-дегі электронның толқындық векторға тәуелділігі көрсетілген. Бұл жағдайда өткізгіштік аймағындағы энергетикалық құрылым көпалқаптық сипатқа ие. $\varepsilon = 0$ энергиясымен бір орталық Γ -алқап бар (санау өткізгіштік аймақтың түбінен басталады) және бірнеше бүйір аңғарлар ([111] бағытта 4–L-алқап және [100] бағытта 3 4–х алқап) Γ -аңғарға қарағанда едәуір үлкен тиімді массалармен орналасқан.



1.3 Сурет - GaAs және InP үшін (а) E энергиясының k толқындық векторына және v электрондар жылдамдығының E өріс кернеулілігіне тәуелділігі

Бұл жағдайда өткізгіштік аймағындағы энергетикалық құрылым көпалқаптық сипатқа ие. $\varepsilon = 0$ энергиясымен бір орталық Γ -алқап бар (санау өткізгіштік аймақтың түбінен басталады) және бірнеше бүйір аңғарлар ([111] бағытта 4–L-алқап және [100] бағытта 3 4–х алқап) Γ -аңғарға қарағанда едәуір үлкен тиімді массалармен орналасқан. Γ -алқаптағы GaAs үшін тиімді масса $m^* = 0,067m_0$, L-алқапта $m^* = 0,55m_0$; Γ -алқаптағы InP үшін $m^* = 0,12m_0$, L-алқапта $m^* = 0,7m_0$ -тең. Сәйкесінше, шағын өрістерде GaAs үшін электрондар жылдамдығының өріске тәуелділігі тік (электрондардың қозғалғыштығы $\mu_1 = 7500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$), ал үлкен өрістерде ол айтарлықтай аз. Сонымен қатар, жоғарғы алқаптағы тиімді масса үлкен және бірнеше жоғарғы алқаптар болғандықтан, олардағы күйлердің тығыздығы едәуір жоғары. Сондықтан, егер электр өрісінің әсерінен электрондар $\Delta\varepsilon$ аралық алқаптың энергиясынан үлкен энергия алса, яғни жоғарғы алқапқа өту үшін жеткілікті болса, онда электрондардың жоғарғы

аңғарға тиімді ауысуы басталады және мұнда тиімді масса үлкен, ал қозғалғыштық әлдеқайда аз болады.

1.3 Ганн диодтарындағы АЖЖ-құрылғылардың сипаттамалары

Тәжірибу жүзінде өзінің кең жолақта қайта құру үшін аса жоғары жиілікті генерациялау және АЖЖ тербелістерді кең жолақты күшейтуінің арқасында ең көп қолданыс тапқан жағары критикалық легирленген Ганн диодтары сәтті пайдаланылуда [23, 24]. Ганн диодындағы физикалық процестерді талдау, үздіксіздік, Пуассон және толық ток теңдеулерін бірге шешу арқылы жасалынады. Егер жартылай өткізгіш құрылымда сыртқы кернеуді қолдану кезінде зарядтар бір бағытта - катодтан анодқа ауысатынын ескерсек, онда көлденең қиманың жазықтығында ток тығыздығы да, электр өрісі де өзгермейді деп болжауға болады. Бұл болжам бір өлшемді теңдеулерге өтуге мүмкіндік береді [25, 26]:

$$\frac{dE}{dx} = - \frac{q}{gs_0} (n - n_0); \quad (1.3)$$

$$J = qnv(E) + qD \frac{dn}{dx}; \quad (1.4)$$

мұнда J -ағып жатқан токтың тығыздығы;

n - бос электрондардың концентрациясы;

E -электр өрісінің кернеулігі;

$V(E)$ - электрондардың диффузия жылдамдығы;

D -электрондардың диффузия коэффициенті

(1.1) және (1.2) ден төмендегі формуланы аламыз:

$$\frac{dn}{dE} = \frac{ss_0}{q} \frac{nv(E) - \frac{J}{q}}{D(n - n_0)}. \quad (1.5)$$

Электрон жылдамдығының кернеуге тәуелділігі галлий арсенидіндегі электр өрісі күрделі көрініске ие болғандықтан, (1.3) теңдеудің шешімі жалпы жағдайда тек сандық әдістермен алуға болады. Алайда, мұндай шешім үшін интеграцияның басталуы ретінде қабылдануы мүмкін белгілі бір нүктеде E функциясындағы n еөбі қажет. Бастапқы теңдеулер жүйесін шамамен шешу әдісін қолдана отырып, бұл жұмыста n -нің n_0 -ден кішкене ауытқуында n және E өрнектері алынды. Бұл қатынас сандық интегралдау әдісін іске асыру қатынас шекаралық n және E мәндерді жүзеге асыру үшін пайдаланылды (1.3). Бұл жағдайда E -нің мәні $E_0 + \Delta E$ түрде берілді, мұндағы $\Delta E \ll E_0$. Мұнда E_0 - (1.4) формуламен анықталатын электр өрісі кернеулігінің шекті мәні.

$$J = qn_0v(E_0) \quad (1.6)$$

Диффузия коэффициентін есептеу кезінде тұрақты және галлий арсениді үшін $v(E)$ аналитикалық тәуелділік қолданылады:

$$v(E) = \frac{\mu_0 E + v_s \left(\frac{E}{E_H}\right)^4}{1 + \left(\frac{E}{E_H}\right)^4}, \quad (1.7)$$

мұнда $\mu_0 = 6000 \text{ см}^2/\text{В с}$; $v_s = 8.5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$; $E_H = 4000 \text{ В/см}$; донорлардың шоғырлануы $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ тең болуы тиіс.

Аса жоғары критикалық легирленген диодтарға тән жұмыс жиілігінің кең спектрі қажетті жолақта ғана емес, сонымен қатар одан тыс аймақта тербелістердің қозуына алып келеді. Сонымен, қуат тізбегіндегі резонанс жағдайларының болуы АЖЖ тербелістер болған кезде төмен жиілікті генерацияның қозуына әкелуі мүмкін [29]. Бірдей диоды бар тізбекте әртүрлі режимдердің болуы мүмкін, бұл токтар мен кернеулердің пішінінің күрт өзгеруі түрінде көрінеді және нәтижесінде тербелістердің спектрлік құрамына әсер етеді.

Мұндай құрылғыны сыртқы тізбекке қосу әр түрлі тербелістердің пайда болуына әкеледі. АЖЖ диапазонда тербелмелі схемаларды есептеу кезінде ескерілуі керек бірқатар ерекшеліктерге ие екенін атап өткен жөн. Сонымен, схеманың құрылымдық элементтерінің реактивті қасиеттері рөл атқара бастайды, бұл әдетте төмен жиіліктегі тізбектерді модельдеу және есептеу кезінде ескерілмейді. Нәтижесінде сыртқы тізбек күрделі тербелмелі процестерді жүзеге асыруға болатын көп тізбекті жүйені құрайды. Сыртқы тізбектің параметрлері, сондай-ақ генератордың өзі пайда болатын тербелістердің түрін анықтайды.

1.4 Ганн диоды негізіндегі Генератор

АЖЖ техникада Ганн диодтарының негізгі қолданылатын орны сөзсіз генераторлар болып табылады.

АЖЖ генератордың негізгі сипаттамалары [8]:

$P_{\text{вых}}$ шығу қуаты - жиіліктердің жұмыс диапазонындағы пайдалы жүктемеге бөлінетін қуаттың ең аз мәні;

ПӘК η - қуат көзінен тұтынылатын шығу қуатының P_0 қуатына қатынасы; жұмыс жиілік диапазоны ($f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$) - берілген шығыс қуаты мен басқа параметрлер қамтамасыз етілетін жиілік диапазоны;

δf жиілігінің тұрақтылығы - жиіліктің f_0 номиналды мәнінен ең үлкен салыстырмалы ауытқуы: $\delta f = \Delta f / f_0$.

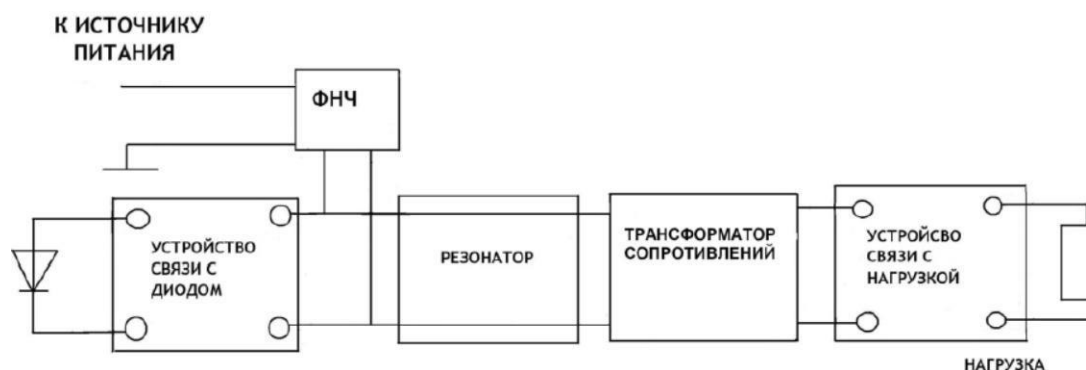
жиіліктің температуралық коэффициенті (ЖТК) $\delta f/\Delta T$, мұндағы ΔT - жиіліктің өзгеруіне әкелетін температураның өзгеруі;

бас тартуға жұмсалған уақытпен айқындалатын сенімділік;

шу сипаттамалары - амплитудалық (жиіліктік немесе фазалық) шу деңгейі.

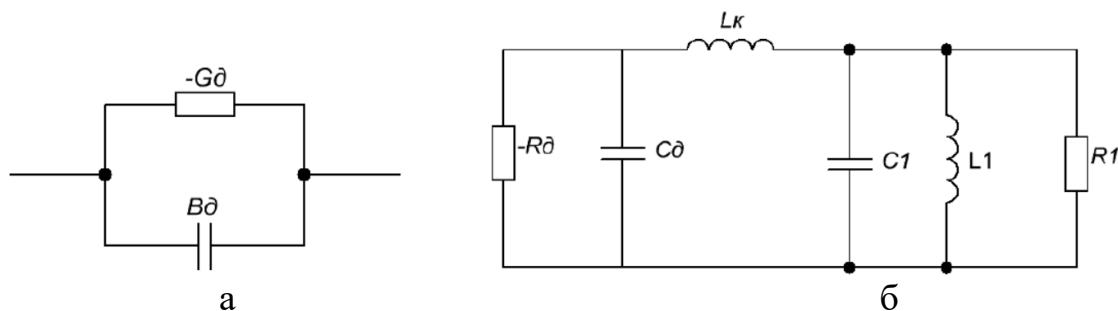
Жалпы жағдайда диод генераторы диодтан, резонатордан, электр тізбегі бойынша төмен жиіліктер сүзгісінен (жоғары жиілік сигналын әлсірету үшін) және диодтың резонатормен және жүктемесі бар резонатормен байланыс құрылғыларынан тұрады.

Ганн диодындағы генератордың жалпыланған құрылымдық схемасы 1.5 суретте көрсетілген.



1.5 Сурет - Ганн диодындағы генератордың жалпыланған құрылымдық схемасы

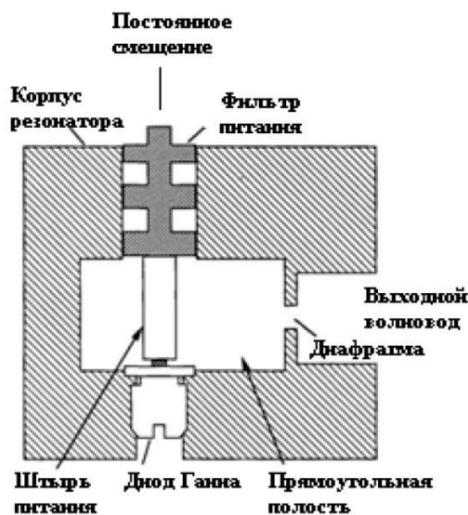
Жоғары жиіліктегі диодтың баламалы схемасы (1.7-сурет, а) теріс өткізгіштік пен сыйымдылықтың параллель қосылуы және баламалы схемадағы резонатор параллель тербелмелі тізбек түрінде (1.6-сурет, б) көрсетілген [9].



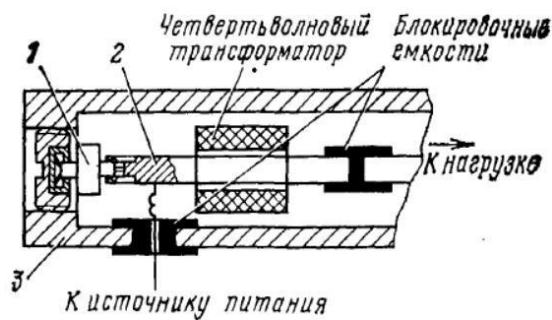
1.6 Сурет - а) Ганн диодының эквивалентті схемасы және б) резонатордағы Ганн диоды.

[1-28] Әдебиетте әртүрлі жиілік диапазондарының генераторларының дизайны бойынша көптеген жұмыстар ұсынылған. Пайдаланылатын байланыс желісіне сәйкес төрт негізгі түрді ажыратуға болады – бұл толқын (1.7-сурет), коаксиалды (1.8-сурет), баспа (микро-жолақты, ойық және т. б.) (1.9-сурет) және гибриді коаксиалды-толқын өткізгіш (1.10-сурет) құрылым.

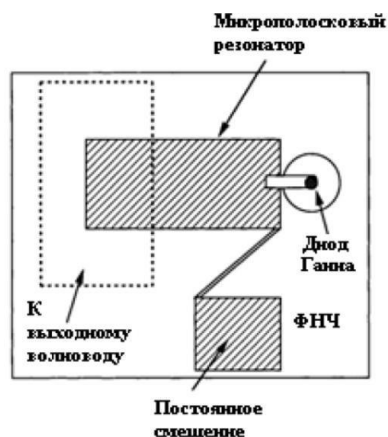
Әр құрылымның өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Мысалы, толқындық конструкция резонатордың ең жақсы сапасын және диодтың ең жақсы жылу шығаруын қамтамасыз етеді, бірақ ол айтарлықтай масса-өлшемдік параметрлерге ие. Микро-жолақтық құрылым басқа құрылғылармен интеграциялану және гибридіт монолитті интегралды схемаларды құру тұрғысынан ең перспективалы болып табылады. Алайда бұл құрылымдағы резонаторлар төмен беріктікке ие және сәйкесінше жиіліктің тұрақтылығы нашар болып келеді.



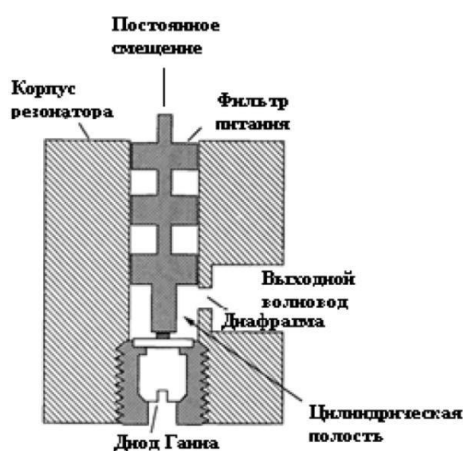
1.7 Сурет - Толқын құрылымның үлгісі [10]



1.8 Сурет - Коаксиалды құрылымның үлгісі [8]



1.9 Сурет - Микро-жолақты құрылымның үлгісі [10]



1.10 Сурет - Гибридті коаксиалды-толқын өткізгіш үлгісі

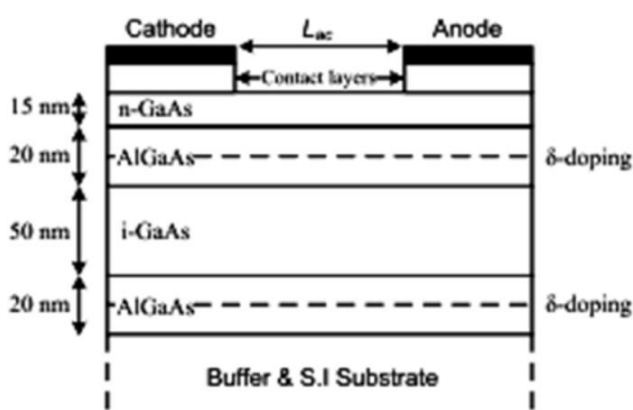
Ганн диодындағы генераторды іске асыру түрін таңдау көптеген факторларға байланысты (әзірленген құрылғының массалық параметрлері, жұмыс жиілігінің диапазоны, қажетті жиілік тұрақтылығы және т.б.), сондықтан таңдау оны әзірлеушіде қалады. Диод, резонатор, электр тізбегі және байланыс құрылғылар, түйіндер әрқашан ортақ болады.

Мұндай генераторлардың өндірілетін қуатының шегі бірнеше ондаған ваттан (сантиметр диапазонының ұзын толқындық бөлігінде) милливатт бірліктеріне дейін болады (миллиметрдің қысқа толқындық бөлігінде), бұл оларды қабылдағыштардың гетеродиндері, сондай-ақ төмен қуатты таратқыштар және, тиісінше, шағын радиус аймағында (жақын радар жүйелері) пайдалануға мүмкіндік береді. Қуатты шектеуді жеңу үшін бірнеше диодтың қуатын қосудың әртүрлі [11-28] нұсқалары қолданылады.

Ганн диодтарында генераторларды қолданудың артықшылығы амплитудалық шудың төмен деңгейі (шамамен минус 120 дБ [8]), 1-ден 150 ГГц-ке дейінгі жиілік диапазонында генераторлардың конструкциясын іске асырудың қарапайымдылығы [10] және жоғары сенімділік (істен шығу үшін 50-100 мың сағат жұмыс істеу [12]) болып табылады.

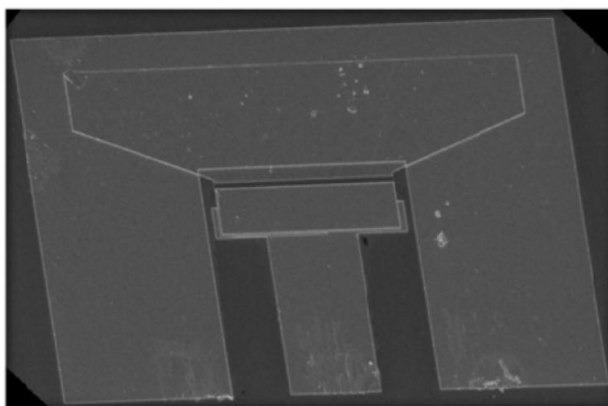
1.5 Ганн диодтарының даму перспективалары

Қазіргі уақытта бүкіл әлемде технологиядағы үлкен прогресті ескере отырып микроэлектроника өнімдерін өндіру бағыты белсенді дамуда және әр түрлі құрылғылардың монолитті интегралды схемаларын (МИС) құру бағыты дамуда. Бұл жаһандық үрдіс Ганн диодтарын айналып өтпеді. Соңғы уақытта ганның планарлы диодтарын, соның ішінде жоғары электронды қозғалғыштығы бар транзисторлармен (ЖЭҚТ) үйлесімді және оларға негізделген құрылғыларды құру бойынша бірқатар жұмыстар жарық көрді [4-7]. Мұндай диодтың типтік құрылымы 1.3 - суретте көрсетілген.



1.3 Сурет - Планарлы Ганн диоды қабаттарының құрылымы

Толқын ұзындығының миллиметрлік диапазонындағы P_0 генерациялайтын қуаты, F_0 жиілігі және пайдалы әсер коэффициентімен (ПӘК) қол жеткізілген мәндерге үміт артуға болады. Сонымен, [5] жұмыста авторлар $P_0 = 0,1$ мВт; $f_0 = 164$ ГГц мәндеріне қол жеткізді. 1.4-суретте сканерлеуші электронды микроскопты пайдалана отырып, авторлар дайындаған планарлық диодтың фотосуреті көрсетілген.



1.4 Сурет - Планарлы диодтың ұлғайтылған суреті [4]

Өндіріс технологиясының ЖЭҚТ-мен [6] және Шотткилық тосқауылы бар диодтармен үйлесімділігі, бірақ элементтің топологиялық мөлшерінің жұмыс жиілігіне тәуелділігі бойынша анағұрлым қатаң талаптары бар бұл бағыт үшін үлкен перспективалар ашады. Тұтас құрылғының монолитті интегралды схемаларын жасауға болады, яғни, интеграцияланған генераторы бар, араластырғышы және аралық жиілік күшейткіші бар АЖЖ диапазон қабылдағыш. Бұл белсенді фазалық антенна торлары немесе жақын радиолокацияның борттық жүйелері сияқты күрделі функционалды құрылғыларды өндіруге кететін шығындарды айтарлықтай азайтады.. Сондай-ақ, құрылғының пассивті және белсенді элементтерінен, басылған антенналардан басқа, бір микросұлбада интеграциялау тиімді болып табылады.

Планарлы Ганн диодтарын пайдалану толығымен монолитті интегралды схемалардың (МИС) генераторларының дамуына әкеледі. Бұл өз кезегінде «кристалдық жүйе» түріндегі құрылғылардың енгізілуінің тағы бір сатысы болып табылады. Бұл өңделетін өнімнің өзіндік құны мен салмағы мен өлшемдерін айтарлықтай төмендеуі мүмкін.

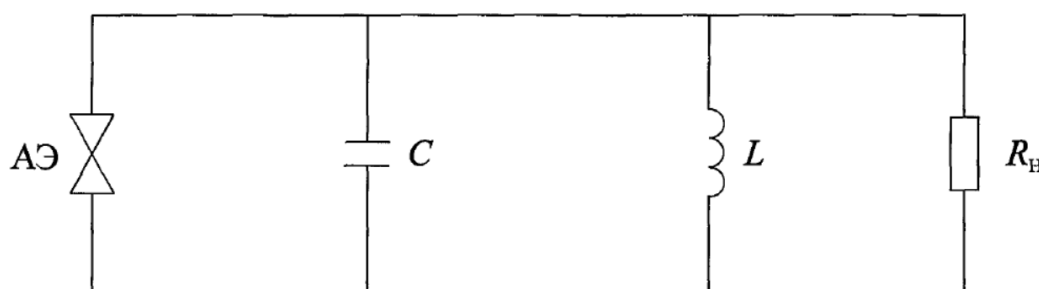
2 СЫРТҚЫ СИНХРОНДАУ РЕЖИМІНДЕ ГАИИ ДИОДЫНДАҒЫ ГЕНЕРАТОРДЫҢ ЖҰМЫСЫН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

2.1 Ганн диодындағы синхрондалған генератор моделі

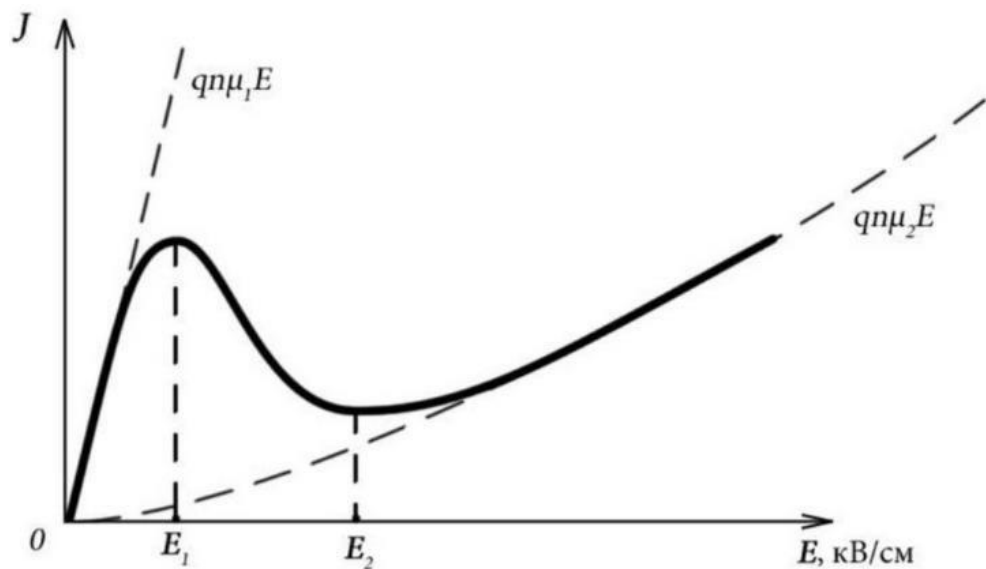
Балама генератор тізбегіндегі сыртқы тізбектің параметрлерін анықтайтын элементтерді таңдау математикалық шешімнің сипатына айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Себебі, Ганн диодындағы процестерді сипаттайтын теңдеуді шешкен кезде сыртқы тізбек диодтағы ток пен кернеудің лездік мәндерінің байланысын анықтайды. Резонаторлық құрылғысы жоқ және генератор тізбегіндегі процестерді сапалы түрде талдауға мүмкіндік беретін қарапайым схема 2.1- суретте көрсетілген.

Ганн диодының типтік динамикалық вольт-амперлік сипаттамасы 2.2- суретте келтірілген. Айта кету керек, кеңістіктік зарядтың пайда болған қабаты ішіндегі өрістің күші оның сыртына қарағанда жоғары болғандықтан, доменді бұзу үшін шекті мәннен төмен өріс күші қажет. Бұл диодтың вольт-амперлік сипаттамасында гистерезис аймағының пайда болуына әкеледі. Сипаттаманың бұл түрі жалпы және белгілі бір жағдайда тізбектегі диодтың жұмыс режимін анықтайтын жартылай өткізгіштің, қуат көзінің және жүктеменің параметрлеріне байланысты.

Жартылай өткізгіш құрылымның мөлшері жұмыс толқынының ұзындығымен салыстырғанда аз болған кезде балама кескінді параметр тізбегін диодқа сәйкесті түрде беруге болады. Қарастырылып отырған Ганн диодының құрылыстары үшін бұл шарт іс жүзінде барлық АЖЖ диапазонда орындалады.



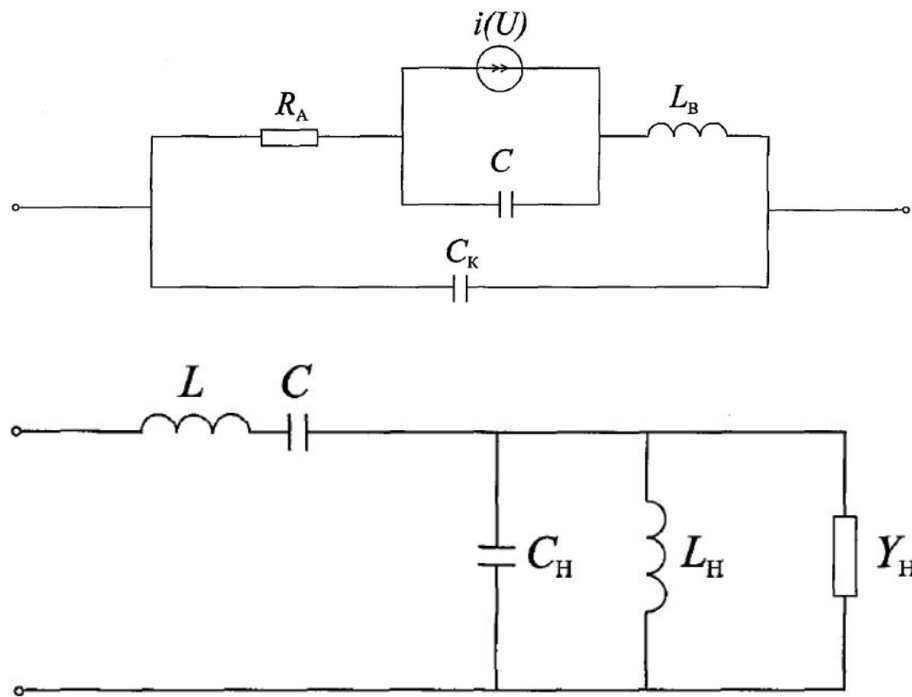
2.1 Сурет - Резонаторлық құрылғы жоқ Ганн диодындағы генератордың эквивалентті тізбегі



2.2 Сурет - Ганн диодының N-тәрізді вольт-амперлік сипаттамасы

АЖЖ диодтардың эквивалентті схемасында сигналдың ауыспалы компонентінің әсер етуі кезінде корпустың конструктивтік элементтері қосымша реактивті кедергіні қалыптастыратынын ескеру қажет. Сонымен, қосымша сыйымдылық ұстағыштың өлшеміне байланысты диод корпусын құрайды; сонымен қатар, мәндерді құрайтын терминалдардың индуктивтілігі кедергіге мГн бірліктеріне дейін айтарлықтай үлес қосады. Сонымен қатар, жартылай өткізгіштің көлемін, омикалық контактілерді және диодтың тұжырымдарын тізбекті белсенді қарсылық түрінде ескеру қажет (2.3а- сурет). Өз кезегінде, Ганн диоды орналастырылған және процестерді модельдеуге ыңғайлы сыртқы тізбек қарапайым жағдайда 2,3б-суретте көрсетілген схемамен ұсынылуы мүмкін. Мұндай схема белсенді және реактивті компоненттері және индуктивті-сыйымдылықты байланыс элементі бар жүктеме параметрлерін модельдейді.

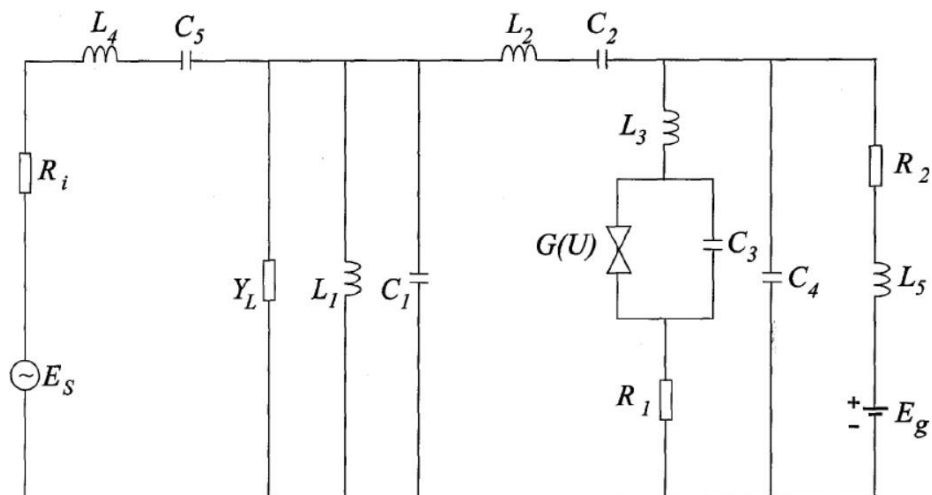
Ганн диодты және резонаторлық жүйені қоса алғанда, құрылғының толық сызбасы көп тізбекті электр тізбегі түрінде ұсынылуы мүмкін, оның параметрлері диод пен резонатордың құрылымдық ерекшеліктеріне, сондай-ақ монтажға байланысты болып табылады. Мұндай генератордың математикалық моделі сызықтық электр тізбектері заңдарын қолдану арқылы алынған дифференциалдық және алгебралық теңдеулер жүйесін береді. Ганн диодының электродинамикалық таратылған моделін талдау диодтың нақты құрылымдық параметрлерін білуді қажет етеді, мысалы, допинг профилі және заряд тасымалдаушылардың жылдамдығы, концентрацияланған параметрлері бар тізбек негізінде генератордың жұмысын модельдеу көптеген эксперименттік мәліметтерден жуық немесе дәл жақындастырылуы мүмкін диодтың сипаттамаларын қолдана отырып, дұрыс талдау жүргізуге мүмкіндік береді.



2.3 Сурет - Корпустағы және сыртқы АЖЖ тізбектегі Ганн диодының эквивалентті схемалары; а – Ганн диодтары, корпус элементтерін ескере отырып; б - сыртқы АЖЖ тізбек

Тәжірибеде кеңінен қолданылатын АЖЖ генератордың құрылымы - бұл тікбұрышты толқын сегментіне орналастырылған теріс кедергісі бар резонатор болып табылады. Резонатордың қуаты мен жиілігі бойынша қайта құрылымдау, қозғалатын қысқа тұйықталу поршенні және түйреуішті реттеу арқылы жүзеге асырылады. Ганна диоды толқын ағынына өзек ұстағышының көмегімен бекітіледі. Сыртқы ұстағышпен бірге оған коаксиал қосылған, оның сыртқы өткізгіші толқын ағынының кең қабырғасына құрылымдық түрде қосылған. Коаксиалдың орталық өткізгішінің көмегімен диодқа қуат кернеуі, сондай-ақ белсенді элементтің резонатормен байланысы жүзеге асырылады. Мұндай байланыстың табиғаты жалпы жағдайда индуктивті де, сыйымдылықты да болуы мүмкін. Сыртқы тұрақты генератордан синхрондалған сигнал беру, циркулятор арқылы немесе тікелей, сондай-ақ сипатталған құрылым орнатылған қолдардың бірінде толқын өткізгіштің көмегімен пайда болуы мүмкін. Мұндай құрылымдағы генератордың толық эквивалентті схемасын келесідей ұсынуға болады (2.4-сурет): өткізгіштіктің, сыйымдылықтың және индуктивтіліктің параллель қосылуымен ұсынылған жүктеме индуктивті-сыйымдылықты байланыс элементтері арқылы сыртқы ЭҚК көзіне және диод тізбегіне қосылады. Диод контурының құрамына, жоғарыда айтылғандай, корпус пен ұстағыштың элементтері кіреді. Қуат тізбегі тұрақты көз түрінде ұсынылған кернеу және синхросигнал көзі сияқты, кейбір ішкі өткізгіштікке ие. АЖЖ диодтардың сызықты емес өткізгіштігі олардың вольт-амперлік сипаттамаларының түрін анықтайды және қарастырылып отырған модельде қуат полиномы $i(U)$ тәуелділіктің жуықтауында қолданады. Жүргізілген

есептеулер осы тәуелділікті, 10-12 ГГц дейінгі жиіліктерде, Ганн диодының динамикалық вольт-амперлік сипаттамасы ретінде қолдану мүмкіндігін көрсетеді.



2.4 Сурет - Ганн диодындағы синхрондалған генератордың баламалы тізбегі

Сызықтық емес дифференциалдық теңдеулер жүйесі түрінде сипатталған көп тізбекті жүйенің математикалық моделін күй айнымалысы әдісі негізінде құруға болады. Күй айнымалылары әдісі сызықтық емес дифференциалдық теңдеулерді сандық интеграциялау арқылы олардың осы жүйесі (жалпы жағдайда алгебралық және сызықтық дифференциалдық теңдеулермен бірге) тұрақты режимге дейінгі сызықтық емес жүйеде өтпелі процесті есептеуге негізделген. Бұл тәсіл генератордың жұмысын тербеліс режимінде шектеусіз қарастырылатын тізбектің әртүрлі нүктелеріндегі токтар мен кернеулердің есептелген уақыттық тәуелділіктері негізінде талдауға мүмкіндік береді. Стационарлық режимді орнатқаннан кейін, осы тәуелділіктерді Фурье қатарына дейін кеңейте отырып, жүйенің амплитудасын, фазасын, берілуін және энергия сипаттамаларын анықтауға болады. Сенімді нәтижелерге қол жеткізу үшін бізге, қажет шартқа сәйкес интеграциялау қадамын таңдау керек

$$h < c \tau_{\min} \quad (2.1)$$

мұнда, τ_{\min} - баламалы тізбектің минималды уақыт тұрақтысы;
 c - таңдалған әдіске байланысты коэффициент.

Сызықтық емес жүйелерді айнымалы күй әдісімен зерттеу, есептеудің күрделілігіне және өтпелі кезеңді есептеу қажеттілігіне байланысты кемшіліктер, олардың уақыты тербеліс кезеңінен бірнеше есе көп болуы мүмкін. Алайда, сызықтық емес жүйелерді зерттеудің бұл әдісі басқаларға қарағанда үлкен артықшылықтарға ие. Мұнда сызықтық емес жүйенің кез-келген параметрлерінің кішілігі немесе тербеліс амплитудасының немесе

фазасының баяу өзгеруі шарттарын орындау талап етілмейді. Алынған шешімдердің орташа және гармоникалық тепе-теңдік әдістерінен айырмашылығы, барлық гармоника (гармоника саны кезеңнің интеграция қадамына қатынасына пропорционал) бар. Жүйеде сызықтық емес тәуелділіктер де толығымен ескеріледі

таңдалған математикалық модель толық физикалық қатандыққа ие емес және есептелген орындалу үлгілерін бағалауға арналғанын ескеру қажет. Алынған нәтижелердің сенімділігінің өлшемі олардың ұқсас сипаттамалары бар жүйені зерттеу жағдайында, алынған эксперименттік деректерге сәйкестігі болып табылады.

2.2 Математикалық модель негізінде Ганн диодындағы синхрондалған генератордың жұмыс режимдерін зерттеу

2.1-де құрылған генератордың баламалы тізбегінің сандық талдауы Ганн диодына негізделген генератордағы синхрондау процестерін теориялық тұрғыдан зерттеу, оның қуаты мен фазалық сипаттамаларын алу мақсатында жүргізілді. Эквивалентті сұлба (2.4-сурет) зерттелетін электродинамикалық жүйеге сәйкес келетін көп тізбекті АЖЖ тізбектен құралған. Ганн диодының жартылай өткізгіш құрылымы параллель қосылған C_3 сыйымдылық түрінде ұсынылған, белсенді сызықты емес өткізгіштік $G(U)$, ВАС бойынша анықталатын $i(U)$, және R_1 тізбекті қосылған кедергі. L_3 , C_4 элементтері тиісінше, диодтың ұстаушысы мен корпусын модельдейді. Параллельді L_1 , C_1 және тізбекті L_2 , C_2 қосылған контурлар АЖЖ-ті диод контурын құрайды, ал Y_L - көпір тізбегінің шығуындағы жүктің баламалы өткізгіштігі. Ганн диодының қоректендіру тізбегі E_g кернеу көзінен, L_5 дросселінен және R_2 кедергісінен тұрады. Синхронды генератордың АЖЖ-ті тізбегінде E_s айнымалы сигнал көзі, R_i кедергісі және тізбекті қосылған L_4 , C_5 контуры бар.

Сызықтық емес белсенді өткізгіштік мәндері төмендегі өрнекпен жуықталған Ганн диодының типтік АЖЖ-ток кернеу сипаттамасынан есептелген:

$$i = Sqn \frac{\left(\frac{\mu_0(U+D)}{L_d} + v_s \left[\frac{U+D}{U_{\Pi}} \right] \right)}{1 + \left[\frac{U+D}{U_{\Pi}} \right]^4}. \quad (2.2)$$

$$\text{Мұнда } \begin{cases} D = 0, \text{ егер } U \leq U_{\Pi} \\ D = 2B, \text{ егер } U > U_{\Pi} \end{cases}$$

$$\mu_0 = 6000 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с};$$

$$v_s = 8.5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$$

$$U_{\Pi} = 4 \text{ В};$$

$$L_d = 10 \text{ мкм} - \text{диод ұзындығы};$$

$$S = 10^{-4} \text{ см}^2 - \text{диодтың көлденең қимасының ұзындығы};$$

$$n = 10^{15} \text{ см}^{-3};$$

q – электрон заряды.

Салынған эквивалентті схема бірінші ретті он дифференциалдық теңдеулер жүйесімен сипатталады:

$$\frac{dU_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1}(i_1 - i_2 - U_{C1} Y_L - i_3);$$

$$\frac{dU_{C2}}{dt} = \frac{i_2}{C_2};$$

$$\frac{dU_{C3}}{dt} = \frac{1}{C_3}(i_4 - i(U));$$

$$\frac{dU_{C4}}{dt} = \frac{1}{C_4}(i_2 - i_5 - i_4);$$

$$\frac{dU_{C5}}{dt} = \frac{i_1}{C_5};$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_4}(E_S - U_{C1} - i_1 R_i - U_{C5});$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_2}(U_{C1} - U_{C2} - U_{C4});$$

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{U_{C1}}{L_1};$$

$$\frac{di_4}{dt} = \frac{1}{L_3}(U_{C4} - i_4 R_1 - U_{C3});$$

$$\frac{di_5}{dt} = \frac{1}{L_5}(U_{C4} - E_g - R_2 i_5);$$

Бұл жүйе сызықты емес және сандық түрде Рунге-Кутта әдісімен шешілді. Синхронды дыбыс гармоникалық түрде орнатылды:

$$E_s = E_0 \sin(2\pi f t)$$

Диодтың жартылай өткізгіш құрылымының параметрлері, өнеркәсіптік үш сантиметрлік Ганн диодтарының сипаттамаларына және баламалы сұлба параметрлерінің пайдаланылған мәндері таңдалған АЖЖ генератордың резонаторлық құрылымына сәйкес келеді. Дифференциалдық теңдеулер жүйесін сандық шешу нәтижесінде Y_L жүктемесіндегі токтың лездік мәндерінің тәуелділігі $i_l(t)$ уақыт функциясы ретінде анықталды. $i_l(t)$ уақыт тәуелділігінің бұзылуын қолдана отырып, жүктемедегі токтың гармоникалық компоненттері Фурье қатарына есептелді, олардың амплитудасы анықталды және Ганн

диодындағы синхрондалған генератордың шығысындағы гармоникалық қуат есептелді:

$$P_{kl} = \frac{i_{kl}^2}{2Y_L},$$

мұнда $i_{kl} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ - токтың гармоникалық компоненттерінің амплитудасы,

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(k\omega t) dt,$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin(k\omega t) dt;$$

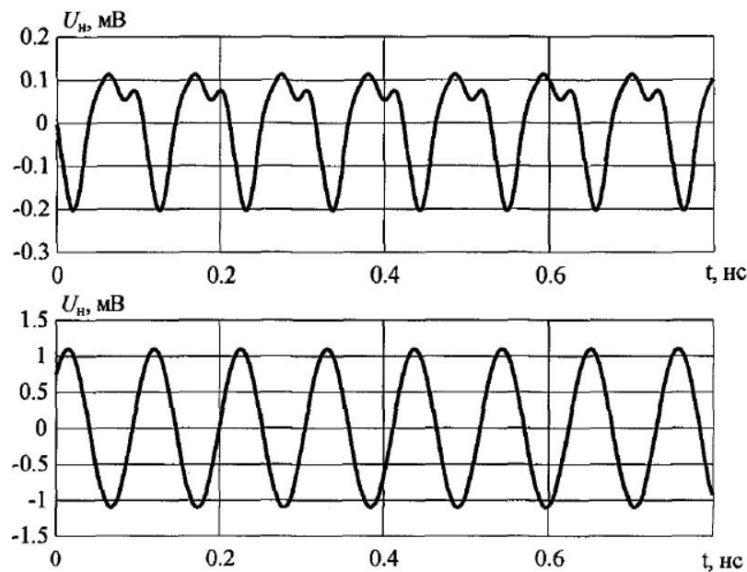
$k=1,2,3,\dots$ - гармоника нөмірі,

$T = 2\pi/\omega$ – тербеліс периоды.

Жүктемедегі тербеліс фазасы келесі формула бойынша анықталды:

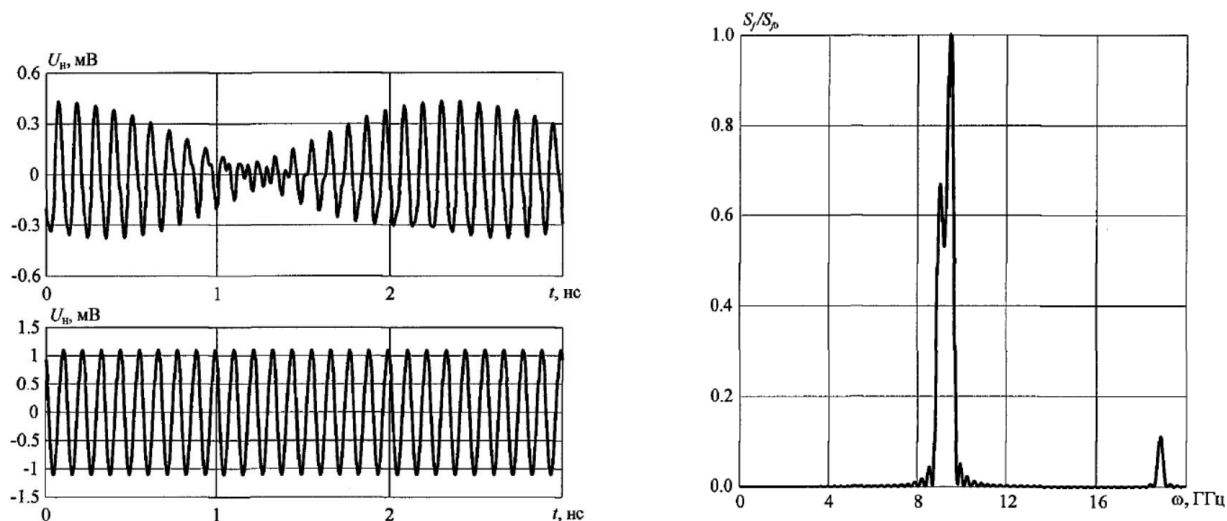
$$\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}$$

Жүргізілген математикалық модельдеу жүйесінде, таңдалған параметрлер мәндерінде Ганн диодының тербелістерінің синхрондалуы анық байқалады. Осылайша, жиілігі $f_c \approx 9,44$ ГГц болатын сыртқы сигнал қолданылған кезде 2.5-суретте көрсетілген тәуелділіктер байқалды. Бұл суретте тербелістердің уақытқа тәуелділігі (жоғарғы-жүктемедегі сигнал, төменгі-синхронды сигнал) көрсетілген.



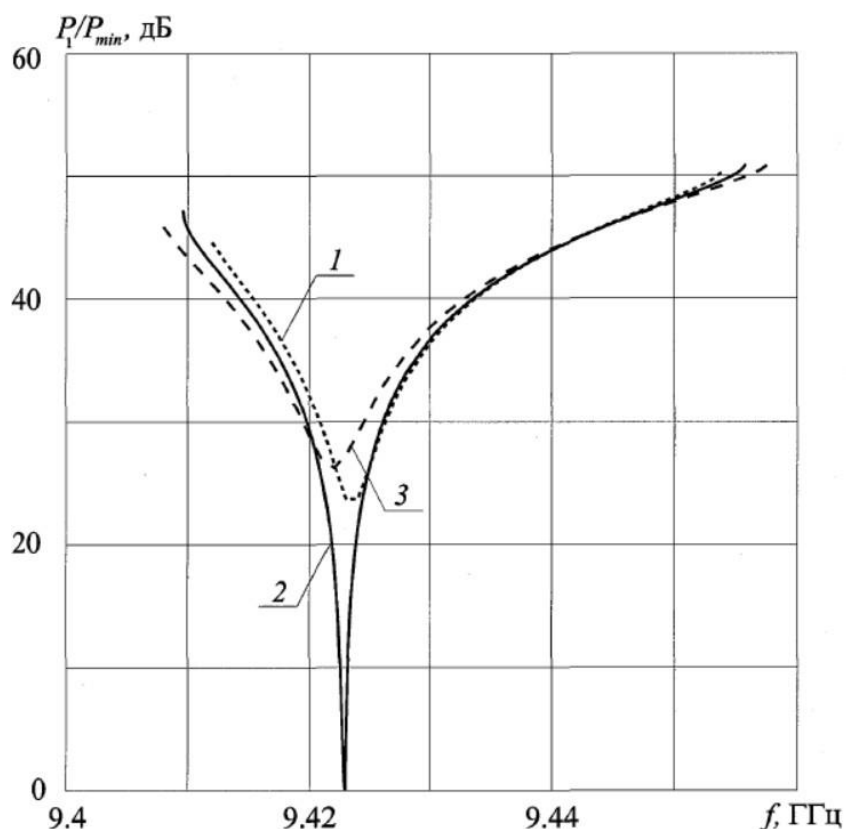
2.5 Сурет - Ганн диодындағы тербелістердің уақытқа тәуелділігі

Синхрондау аймағынан тыс процестерді бақылау үшін, жиілік синхрондау сигналы түсіру аймағынан тыс орнатылды. Мысалы, 2.6-суретте $f_c \approx 9$ ГГц жиіліктегі тербеліс сызбасы суретте көрсетілген. Бұл жағдайда жүктеменің ауытқуы соққы сипатына ие. Спектрлік тығыздық графигінде синхрондау сигналына және АЖЖ-генератор сигналына сәйкес келетін екі шын айқын көрінеді.



2.6 Сурет - Ганна диодындағы синхрондалған генератордың соққы режимі

Сипатталған модель негізінде Ганн диодындағы синхрондалған генератордың (ГДСГ) қуат-жиіліктік сипаттамалары (ҚЖС) есептелінді. Шығу сигналының қуатының алынған тәуелділіктері синхрондау аймағында жиіліктің минимумына тең болады. ГДСГ-дың қуат-жиіліктік сипаттамаларын есептеу нәтижесі 2.7-суретте көрсетілген.



2.7 Сурет - Ганн диодындағы синхронды генератордың қуат-жиіліктік сипаттамалары

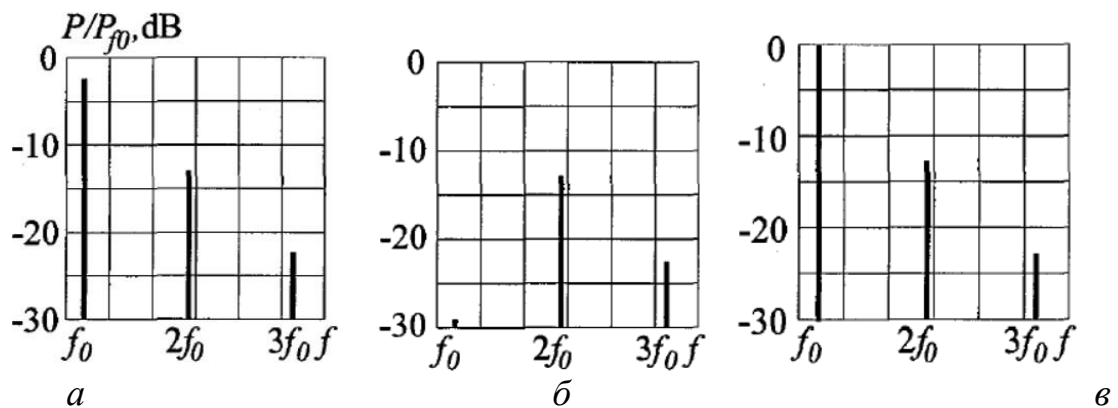
1 - $P_c=12.1$ мВт; 2 - $P_c=14$ мВт; 3 - $P_c=16.9$ мВт

Есептеулер көрсеткендей, синхрондау жолағында сыртқы сигнал жиілігінің өзгеруімен алғашқы гармониканың ГДСГ-дың шығыс сигналының қуатының күрт өзгеруі байқалады. Сонымен қатар, екінші және үшінші гармониканың мәні тұрақты болып қалады. Бұл жүктеме кезіндегі кернеудің тербелістерінің фазалық жағдайының айтарлықтай өзгеруіне әкеледі. 2.8-суретте генератордың P/P_{f0} сыртқы сигнал жиілігінің әртүрлі мәндері кезіндегі шығыс сигналының спектрограммалары көрсетілген. Мұнда P_{f0} - синхросигналдың жиілігі мен Ганн диодындағы генератордың табиғи тербелістерінің жиілігі арасындағы белгіленген бұзылу мәні бар шығыс сигналының алғашқы гармоникасының қуаты.

Синхрондау сигналы қуатының оңтайлы мәнінде ГДСГ-ның шығыс сигналының бірінші гармоникасының қуаттылығының есептелген өзгерісі, синхрондау аймағында шамамен 50 дБ-ді құрады. Сонымен бірге, минималды ҚЖС кезінде ($\Delta f = -7$ МГц) шығыс сигналының бірінші гармоникасының қуаты, екінші және үшінші гармониканың қуатына қарағанда шамамен 15 дБ аз болады. Қуат-жиілік сипаттамасының беріктігі м бұл нүктенің айналасында максималды 30 дБ/МГц-ке жетеді.

$$S_{\text{мчх}} = \frac{\Delta(P/Pf_0)}{\Delta f}$$

$P_c = 14$ мВт синхрондау сигналының қуатын орнатқанда, синхрондау өткізу қабілеті $\Delta f_c = 50$ МГц болды (9,41 ГГц-ден 9,457 ГГц). Синхросигналдың қуаты азайған кезде жолақтың мәні төмендеді, ал қуаттың жоғарылауымен ол өсті. Сонымен қатар, жүктеме кезінде бірінші гармоника сигналының максималды басылуын қамтамасыз ететін, үлкен немесе кіші синхросигналдың қуат мәндерімен минималды ҚЖС-дағы шығыс сигналының мәні артады (2.7- сурет). Генератордың өздігінен тербелу қуатын синхронды сигналының қуатымен салыстыруға болады.



2.8 Сурет - Жүктемедегі синхрондау жолағындағы бұзылудың әртүрлі мәндерінде тербелістердің спектрограммалық және фазалық көріністері: а

$$\Delta f = -20 \text{ МГц}; \Delta f = -8 \text{ МГц}; \Delta f = 20 \text{ МГц}$$

Осылайша, Ганн диодындағы синхрондалған генераторды теориялық зерттеу нәтижесінде Ганн диодының өздігінен тербелу қуатымен салыстырылатын синхросигналдың қуаты кезінде және синхрондау жолағындағы сигналдардың фазаға қарсы жетуінде, шығыс сигналының 50 дБ-ге дейін басылуы байқалатыны анықталды. Экстремум төңірегіндегі қуат-жиілік сипаттамасының беріктігінің есептік мәндері 30 дБ/МГц - ке жетеді. Сондай-ақ, минималды ҚЖС-дағы шығу қуаты мәнінің синхронды сигнал қуатының мәніне тәуелділігі монотонды емес екендігі анықталды. ГДСГ жұмысын талдаудың теориялық әдісінің артықшылығы, ол қолданыстағы аналитикалық әдістерге тән шектеулер қоймайды, мысалы, жұмыс істейтін синхронды сигналының төмен деңгейі және генератордың электродинамикалық схемасының жеңілдетілген құрылымы болып табылады.

3. ГЕНЕРАТОРЛЫҚ - ТҮРЛЕНДІРГІШ ҚҰРЫЛҒЫЛАР МЕН ОЛАРДЫҢ ЭЛЕМЕНТТЕРІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

3.1 Тербелістердің өсуін X жолақты Ганн генераторында эксперименттік бақылаулар

Осы жұмыста генератордың резонаторында әлсіз сыртқы радиожиилік өрісі және тұрақты токтың ығысу кернеуі ($V_{\text{ы}}$) шекті мәннен төмен болған кезде ГГ да тербелістердің пайда болу проблемасына оралуы зерттелді. Сондай-ақ, резонатордағы ЖЖ өрісінің жиілігі мен қуатының өзгеруінің осындай жағдайлардағы ГГ динамикасына әсері зерттелді. Сандық модельдеу және эксперименттік зерттеулер ГГ ығысуында (яғни, ТДК жұмыс аймағы үшін тұрақты токтың шекті мәнінен төмен $V_{\text{ы}}$ бар) әртүрлі динамикалық күйлерді көрсетеді. Олар тұрақты токтың ығысу мөлшеріне байланысты сәйкесінше генераторлық емес, квазипериодты, хаотикалық және периодты тербелмелі күйлер болып табылады.

3.2 Генератордың теориялық-схемалық моделі

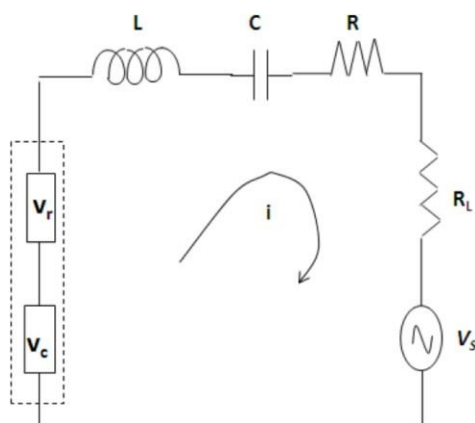
Белсенді аймақта ығыстырылған Ганн диодының жұмысы туралы білімге сүйене отырып, оны кернеуге тәуелді сызықты емес тізбектің екі элементінің параллель немесе дәйекті комбинациясымен модельдеуге болады: біреуі резистивті, ал екіншісі сыйымдылықты. Диодқа қолданылатын тұрақты кернеу шекті мәннен өткенде, ол ТДК аймағында жұмыс істейді және осы ТДК мәні $V_{\text{ы}}$ шамасының функциясы болып табылады. Осылайша, диод арқылы қосымша ток (i) мен диодтағы қосымша кернеу (v_r) арасындағы байланыс сызықты емес. Оны сызықты емес текше түрі ретінде қарастыра отырып былай жазуға болады:

$$v_r = -\beta_1 i + \beta_3 i^3 \quad (3.1)$$

Мұнда β_1 және β_3 - сызықтық және сызықты емес кернеуі және ток арасындағы тәуелділік. Олардың шамалары қолданылатын $V_{\text{ы}}$ шамасымен анықталады. Шекті мәннен жоғары β_1 теріс болып табылады. Айнымалы ток моделіндегі диодтың сыйымдылығы белсенді күйде теріс заряд болған кезде, диод материалының тиімді диэлектрлік тұрақтылығының өзгеруіне байланысты кернеуге тәуелді болып қабылданады [8]. Осылайша, (v_c) лездік кернеуді эквивалентті конденсаторға лездік заряд ($q = \int i \cdot dt$) тұрғысынан келесідей жазуға болады:

$$v_s = -a_1 q + a_3 q^3 \quad (3.2)$$

Мұнда a_1 және a_3 диод сыйымдылығының сызықтық және сызықты емес құрамдастарын ескеретін параметрлер. Осылайша, Ганн диоды ($i = dq/dt$) лездік ток өткен кезде екі сызықты емес v_r және v_s кернеу көздерінің тізбектелген комбинациясымен ауыстырылады. Толқын түріндегі резонатор L индуктивтілікті, C конденсаторының және R резисторының тізбектелген комбинациясымен ауыстырылады. Бұл R резонатордағы және жүктеме резисторындағы жоғалтуларды қадағалайды. 1-суретте айнымалы ток тізбегіндегі ГГ-ның теориялық моделін көрсетеді. 1-суретте көрсетілген v_s кернеу көзі, резонатор ішінде сыртқы өрістің бар екенін көрсетеді. Ол шекті температураға байланысты шу кернеуінен басқа сыртқы өріс болмаған кезде қысқа тұйықталумен ауыстырылады.



3.1 Сурет - Ганн генераторының тізбекті эквивалентті сұлбасы.

Жүйенің динамикасын сипаттайтын дифференциалдық теңдеу Кирхгоф тор заңын қолдану арқылы, 1-суретте көрсетілген Ганн генераторының модельінен алынады. Алынған теңдеу кейбір логикалық ауыстыру және қалыпқа келтіруден кейін келесідей көрініс табады [19]:

$$\frac{d^2q}{dc^2} = aq - bq^3 + c \frac{dq}{dc} - d \left(\frac{dq}{dc} \right)^3 + q \cos(\Omega r) \quad (3.3)$$

Мұнда $\frac{dq}{dc} = i$ лездік айналым тогы, ал $r (= \omega_r t)$ бұл қалыпты уақыт. $\omega_r (= 1/\sqrt{LC})$ резонатордың резонанстық жиілігі болып табылады. Ω және q_s сәйкесінше қуыста болатын сыртқы өрістің амплитудасы мен нормаланған бұрыштық жиілігіне тең заряд. a , b , c және d коэффициенттері құрылғының резистивті және реактивті бөліктерімен және резонатордың кедергісімен байланысты:

$$a = \alpha_1 C - 1 \quad (3.4)$$

$$b = \alpha_3 C \quad (3.5)$$

$$c = \frac{\beta_1 - R - R}{w_r L} \quad (3.6)$$

$$d = \frac{\beta_3 w_r}{L} \quad (3.7)$$

a , b , c және d коэффициенттері α_1 , α_3 және β_1 , β_3 шамаларының ығысуына байланысты V_B шамасынан анық емес түрде тәуелді екені анық көрініп тұр. α_1 және α_3 сыйымдылық параметрлерімен байланысты болғандықтан, олардың мәндері тербеліс жиілігін анықтайды. β_1 және β_3 құрылғының кедергісімен байланысты болғандықтан, олар тербелістердің пайда болуын талдауда көбірек назар аударуды қажет етеді. Сонымен қатар, салыстырмалы β_3 мәні β_1 -ге қарағанда әлдеқайда аз, сондықтан d параметрін c -тен аз етіп алуға болады. Қолданылатын тұрақты токтың ығысуының өзгеру әсері c өзгерісін ескере отырып зерттеледі. Мұнда V_B мәнінің жоғарылауы c мәнінің төмендеуіне әкелетінін ескерген дұрыс [19].

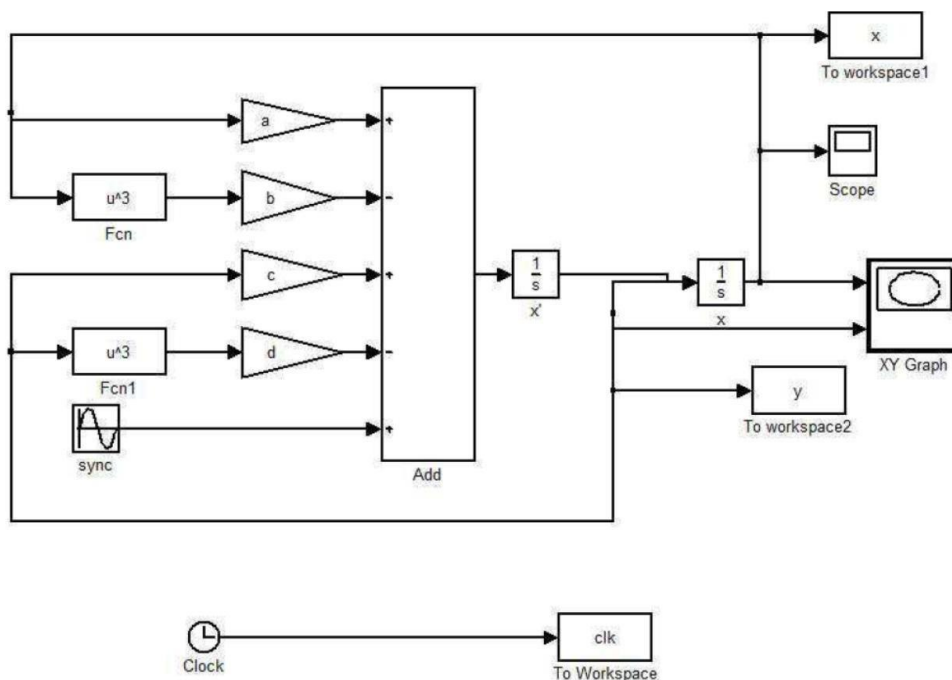
3.3 Сандық талдау

Егер мүмкіндігі болмаса, жабық пішіннің жалпы шешімін алу қиын (3). Осылайша, бұл мәселенің сандық шешімі келесідей алынады. Жаңа p күй айнымалысын енгізіп, жазамыз:

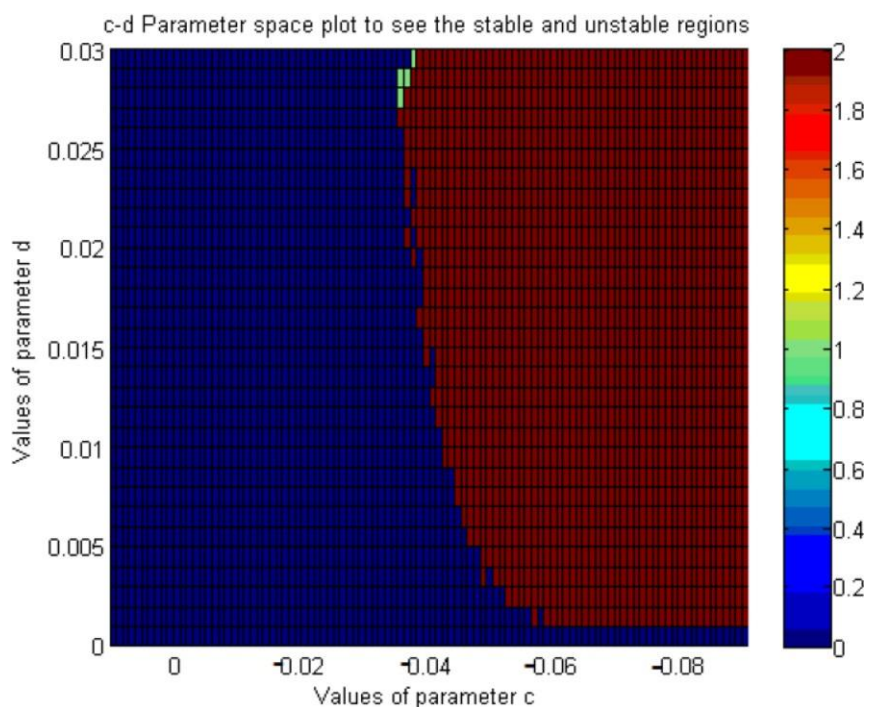
$$\frac{dq}{dc} = p \quad (3.8)$$

$$\frac{dq}{dc} = aq - bq^3 + cp - dp^3 + q_s \cos(\Omega r) \quad (3.9)$$

Содан кейін (8) және (9) MATLAB негізіндегі Simulink бағдарламалық жасақтамасымен модельденеді. Бұл 2-суретте көрсетілген. Алдымен біз сыртқы радиожиілік өрісі болмаған кезде, синусоидалы көзді Simulink–тік ГГ-ы моделінен ажырату арқылы ГГ-ның динамикасын зерттейміз.



3.2 Сурет - Сыртқы ЖЖ-көзі болған кезде Ганн генераторының Simulink моделі.

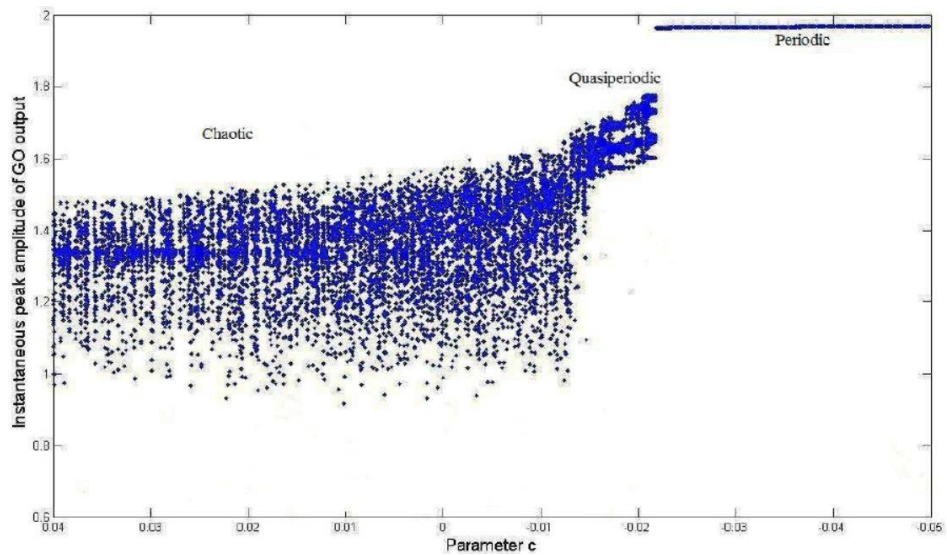


3.3 Сурет - Еркін жұмыс істейтін Ганн генераторының ($a = 1$, $b = 1$) тербелмейтін (көк) және тұрақты тербелмейтін (қызыл) аймағын көру үшін c - d параметр кеңістігінің графигі.

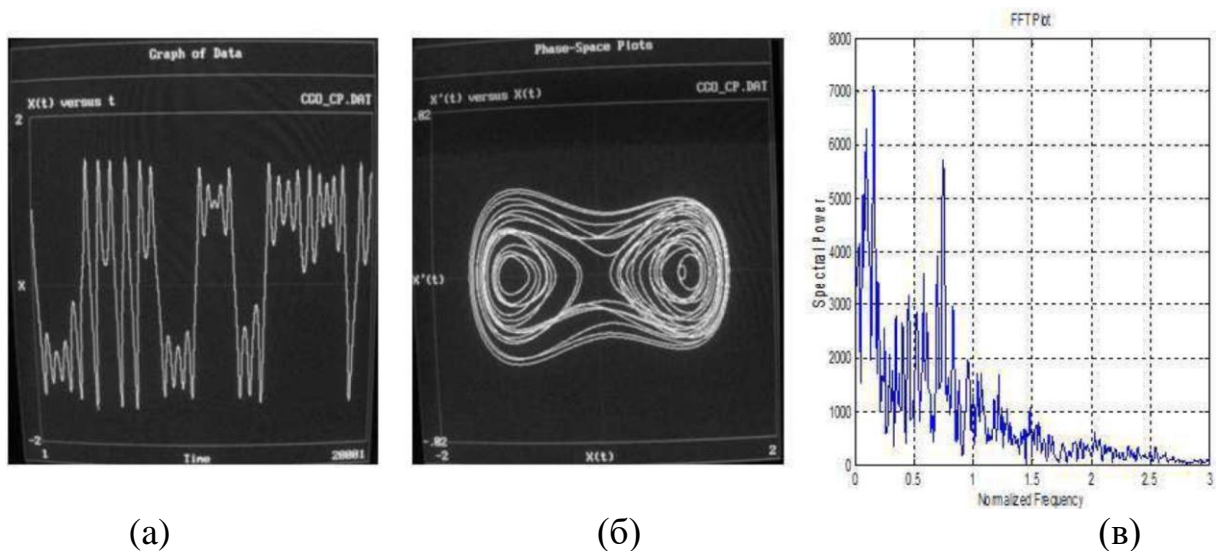
$a = 1$ және $b = 1$ ескере отырып, біз c және d үшін әртүрлі мәндер жұптарын аламыз және жүйенің динамикалық күйін табу үшін модельдеуді жүргіземіз. Алынған күй тербелмелі немесе тербелмелі емес сипатқа ие. 3-суретте осы

екі жағдайға, c және d -ға кіретін параметрлер кеңістігі көрсетілген. 3-суретті қолдана отырып a , b , c және d мәндерінің белгілі бір жиынтығы үшін белгіленген q және p мәндері алынады. Бұл q және p мәндері келесі үлкен (азайтылған) c мәні бар модельдеу үшін бастапқы мәндер ретінде қабылданады. Біз $a = 1$, $b = 1$, $d = 0.015$ алып, c өзгерісінің әсерін зерттейміз. c біртіндеп 0,06-дан төмендегенде және жүйе $c = 0,06$ тең болғанда өзгере бастайды. Параметрлердің осы мәндерінде нормаланған жиілік және ГГ-ның еркін жүрістің амплитудасы сәйкесінше 1,27 және 2,0 ретінде есептеледі. Содан кейін c мәнін $-0,06$ -дан жоғарылату арқылы $c=0,01$ -де тербелістердің өшуі алынады. Бұл екі түрлі мән тұрақты токтың ығысу кернеуіне байланысты қозғалыста тербелістер пайда болған және жойылған кезде "гистерезис" құбылысының пайда болуын көрсетеді.

Сыртқы радиожиілік өрісінің әсері $q_s \cos(\Omega r)$ қосымша мүшесін ескере отырып зерттеледі (9). $a = 1$, $b = 1$, $d = 0,015$ кезінде, бұрынғыдай, біз q_s және сәйкесінше 0,15 және 1,27 ретінде қабылдаймыз (бұл резонатордағы ГГ-ның еркін жүру жиілігіне жақын әлсіз ЖЖ өрісінің болуын қамтамасыз етеді). Содан кейін біз параметрді өзгерту арқылы ығысуды өзгерту туралы сандық экспериментті қайталаймыз. Бағаланған уақыт қатарларының деректерінен белгілі бір c мәні үшін тербелістердің лездік шыңы амплитудасы алынды және дәл сол көрсетілген. Модельдеу c -ның әр түрлі мәндері үшін қайталанды. 4-суретте ГГ-ның динамикасы қуыста әлсіз ЖЖ-тік өрісінің болуына байланысты айтарлықтай өзгертіні көрсетілген. Оның ЖЖ-өрісі болмаған кезде пайда болуына байланысты, осцилляциялық емес режимнен тербелмелі режимге өту процесі жылдам орындалмайды. ГГ-ның динамикасындағы c мәні өзгерген кезде, ол тұрақты тербеліске жеткенге дейін хаотикалық және квазипериодты күйлері алынады. $c = -0,001$ кезінде сандық модельдеу нәтижелері 5-суретте көрсетілген. q уақытының өзгеруі және q және p -ның күй айнаымалыларын қолдана отырып, фазалық кеңістіктің диаграммасы сәйкесінше 5(а) және 5(б) суреттерде көрсетілген. Уақыт өте келе q өзгерісі тұрақты емес, ал фазалық кеңістік графигі екі рет айналдыру түріне ие болады. Бұл, жүйенің динамикасы ықтимал хаотикалық екенін көрсетеді. Уақыт қатарлары деректерінің алғашқы Фурье түрлендіруі арқылы алынған q жиілік спектрі және кең жолақты үздіксіз түрі 5-с суретте көрсетілген. Бұл хаотикалық сигналдың көрінісі. Осылайша, тербелістердің күйі сапалы түрде хаотикалық деп танылады. Бірақ хаосты сандық бағалау үшін әр түрлі хаос кванторларын бағалау керек, мысалы, Ляпуновтың максималды көрсеткіші (ЛМК), Корреляциялық өлшем (КӨ) және т. б.



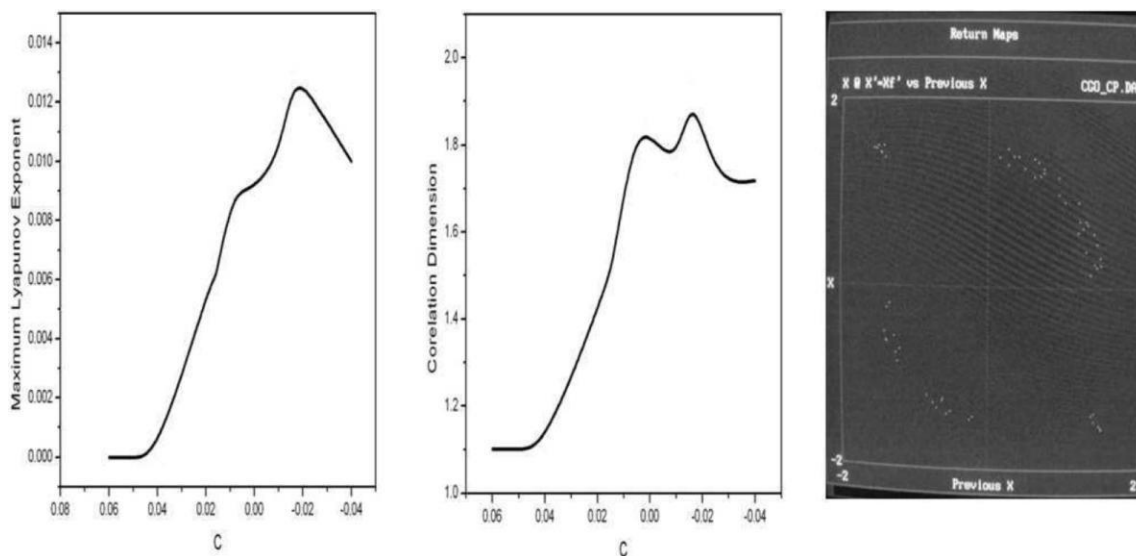
3.4 Сурет - Хаотикалық, квазипериодты және тұрақты периодты тербелмелі күйлерді көрсететін c параметрімен Ганн генераторының шығысының лездік амплитудасының өзгеруі ($a = 1, b = 1, d = 0.015, q_s = 0.15, \Omega = 1.27$)



3.5 Сурет (а) Уақыттық аймақ, (б) фазалық кеңістік, (в) ГГ-ның шығу сигналының жиілік спектрі ($a=1, b = 1, c = 0$ және $c = -0.001, d = 0.015, q_s = 0.15, \Omega = 1.27$).

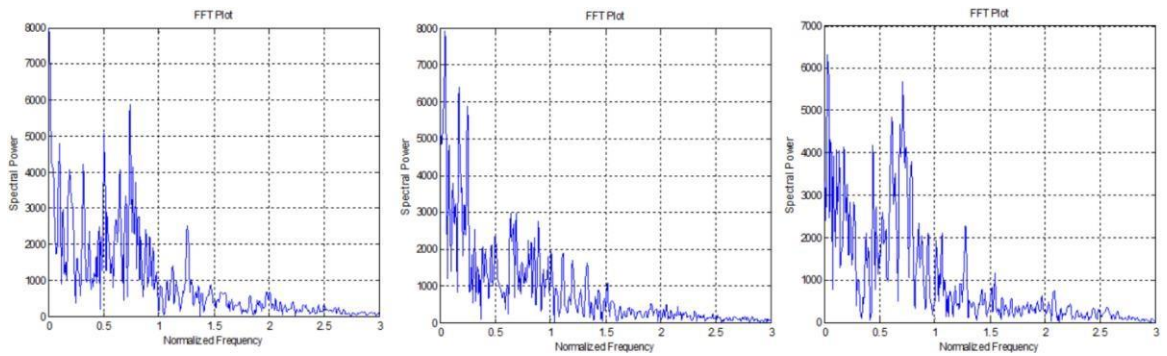
Ляпунов көрсеткіші-бұл фазалық кеңістіктегі жақын траекториялар бөлінетін жылдамдықтың өлшемі. Жалпы жағдайда динамикалық теңдеулер сияқты көптеген көрсеткіштер бар, ал хаотикалық орбиталар үшін кем дегенде бір оң Ляпунов көрсеткіші болуы керек [20, 21], ал мұнда мерзімді орбиталар сияқты Ляпуновтың барлық көрсеткіштері теріс. Корреляциялық өлшем (КӨ) - бұл жүйенің күрделілігінің тағы бір өлшемі [22, 23]. Ол тартушы нүктелердің тығыздығын ескереді. ЛМК есептеу уақыт аймағындағы жүйенің мінез-құлқына негізделген болса, КӨ есептеу

Мемлекеттік кеңістіктегі тартқыштың геометриялық құрылымына назар аударады. КӨ-ның бүтін сан емес мәні аттрактордың өзгеше екенін көрсетеді, демек бұл оның динамикасы хаотикалық екенін көрсетеді. Біз ЛМК және КӨ-ді сандық эксперимент нәтижесінде алынған уақыт сериялары бойынша және J. C. Sprott-тың КӨ [24] көмегімен бағаладық. 6(a) және 6(b) суреттерде c параметрінің әртүрлі мәндері үшін бағаланған ЛМК және КӨ өзгерістері сәйкесінше көрсетілген. c мәндерінің ауқымы үшін оң ЛМК және бүтін емес КӨ мәндері алынды. Атап айтқанда, берілген диапазон үшін алынған ЛМК мәндері 0-ден 0,013-ке дейін, ал КӨ мәндері 1,1-ден 1,9-ға дейін. ЛМК-дің кішкентай, бірақ оң мәндері динамиканың хаотикалық екенін көрсетеді және бұл бақылау одан әрі дұрыс емес, ол КӨ-ның бүтін емес мәндерімен расталады. Алайда, осылайша алынған детерминистік хаос төмен өлшемді және басқарылатын болып табылады [21-23, 25, 26]. Сондай-ақ, біз КӨ [24] көмегімен уақыттық қатарлардың кері картасын алдық, өйткені фазалық кеңістіктің екі өлшемді графигі кездейсоқ және хаотикалық деректерді ажыратпайды. Артқа айтару картасы 6-с суретте көрсетілген. Ол p тұрақтыға мәнге тең болған сәтте q мәнін көрсетеді, ал p алдыңғы сәттегі q мәнімен салыстырғанда сол тұрақтыға мәнге тең болады. Артқа қайтару картасы, таңдалған уақыт сериялары үшін жүйенің хаотикалық динамикасын көрсетеді.



3.6 Сурет - (а) ЛМК, (б) c параметрі бар КӨ, (с) уақыт қатарының артқа қайтарылған деректер картасы ($a = 1$, $b = 1$, $c = 0.001$, $d = 0.015$, $q_s = 0.15$ және $\Omega = 1.27$).

Әлсіз радиожилік өрісінің жиілігі ығысқан ГТ динамикасына қалай әсер ететінін зерттеу үшін, сандық модельдеу a , b және d параметрлерінің мәндерін бұрынғыдай $c=0.001$ -ға тең етіп алып, содан кейін оларды өзгерту арқылы жүргізілді. 7-суретте түрлі мәндердегі ГТ-ның жиілік спектрінің өзгеруі көрсетілген.



3.7. Сурет - Қосымша шығстың жиілік спектрлері (а) $\Omega = 1.256$,
 (б) $= 1.269$, (с) $= 1.279$ ($a = 1$, $b = 1$, $c = 0.001$, $d = 0.015$ және $q_s = 0.15$)

Эксперименттік талдауда X-диапазондағы тербелістердің пайда болуына қатысты кейбір жаңа бақылаулар сипатталған. Генератордың резонаторында әлсіз жж өрісінің болуы ГГ-ның динамикасын айтарлықтай өзгертетіні анықталды. Мұндай өрістер болмаған кезде ГГ-ның тұрақты тогының ығысуы төмен мәннен баяу өзгереді және генератордың ығысу кернеуінің шекті мәнінен кейін кенеттен тербелмелі күйге ауысады. Бұл зерттеу X-диапазонында хаотикалық тербелістерді құрудың ыңғайлы әдісін ұсынады. Тұрақты токтың шекті мәннен төмен ығысу кернеуі және GO резонаторында қолданылатын сыртқы радиожиілік өрісі осындай хаос генераторын басқарудың қолайлы параметрлері болуы мүмкін. Бұл жүйе АЖЖ-ті хаотикалық байланыста қолданылуы мүмкін.

ҚОРЫТЫНДЫ

Дипломдық жұмыста Ганн диодындағы генератордың жұмысына эксперименттік зерттеу жүргізілді және оптикалық сәулеленудің генератор жұмысына әсері зерттелді. Дипломдық жұмыстың негізгі нәтижелерін төмендегідей тұжырымдауға болады : Бірінші бөлімде Ганн диодтарындағы аса жоғары жиілікті құрылғылардың параметрлік сипаттамалары және олардың түрлері теориялық тұрғыдан зерттелді. Екінші бөлімде синхронды сигнал мен жүктеме параметрлерінің өзгеруі нәтижесінде генераторда болып жатқан процестерді, сондай-ақ сыртқы өрістер мен сәулеленулердің әсерін жоғары сенімділік деңгейімен модельдеуге мүмкіндік беретін Ганн диодында синхрондалған АЖЖ-ті генератор (ГДСГ) моделі жасалды. Математикалық модель негізінде генератордың жұмыс режимдері дифференциалды теңдеулермен сипатталды. Үшінші бөлімде Х-диапазондағы Ганн генераторында тербелістердің пайда болуына қатысты бақылаулар эксперименттік тұрғыдан орындалды. Генератордың резонаторында әлсіз жоғары жиілікті өрісінің болуы ГГ-ның динамикасын айтарлықтай өзгертетіні анықталды. Дипломдық жұмыс тапсырмасында қойылған барлық тапсырмалар толықтай орындалды.

ҚЫСҚАРТУЛАР ТІЗІМІ

АЖЖ – аса жоғары жиілікті

ГД – Ганн диоды

СГ- синхрондалған генератор

ГДСГ - Ганн диодындағы синхрондалған генератор

ЖЭҚТ - жоғары электронды қозғалғышты транзисторлар

МИС - монолитті интегралды сұлба

ЭҚК – электр қозғалушы күш

ҚЖС - қуат-жиіліктік сипаттама

ГГ – Ганн генераторы

ТДК – теріс дифференциалды коэффициент

ЛМК - Ляпуновтың максималды көрсеткіші

КӨ - Корреляциялық өлшем

ПАЙДАЛАНЫЛГАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Касаткин Л. В., Чайка В. Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. — Севастополь: Вебер, 2006. — 319 с.: ил.
2. В.Ю. Конев, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, В.П. Губанов, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев // Журнал технической физики, 2015, том 85
3. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Физика работы полупроводниковых приборов в сұлбах СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 376 с
4. Demonstration of the self-mixing effect with a planar Gunn diode at millimeterwave frequency/ L. B. Lok ; Chong Li ; A. Khalid ; N. J. Pilgrim ; G. M. Dunn ;
5. Д.Усанов Д. А., Горбатов С. С, Скрипаль А. В. Особенности низкочастотной генерации СВЧ диодов Ганна // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1981. Т.24,
6. Khalid A. In 0.53 Ga 0.47 As Planar Gunn Diodes Operating at a Fundamental Frequency of 164 GHz / A. Khalid, C. Li, V. Papageorgiou, G. M. Dunn, M. J. Steer, I. G. Thayne, M. Kuball, C. H. Oxley, M. Montes Bajo, A. Stephen, J. Glover, and D. R. S. Cumming // IEEE electron device letters. – 2013. – Vol. 34. – №. 1. – P. 39–41.
7. B. C. Sarkar, *, C. Koley, A. K. Guin, and B. Sarkar "Some numerical and experimental observations on the growth of oscillations in an x-band gunn oscillator," Progress in electromagnetics research b, vol. 40, 325-341, 2012.
8. Полупроводниковые приборы СВЧ. [Электронный ресурс]: электронное учебное пособие / Ю.М. Нойкин, Т.К. Нойкина, А.А. Усаев. М-во образования и науки Российской Федерации Федеральное гос. автономное образовательное учреждение высшего проф. образования "Южный федеральный ун-т", Физический фак. - Ростов-на-Дону : Южный федеральный ун-т, 2014
9. Papageorgiou V. Cofabrication of Planar Gunn Diode and HEMT on InP Substrate/ V. Papageorgiou, A. Khalid, C. Li, D. R. S. Cumming // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2014. – Vol. 61. – №. 8. – P. 2779–2784.
10. Papageorgiou V. Cofabrication of Planar Gunn Diode and HEMT on InP Substrate/ V. Papageorgiou, A. Khalid, C. Li, D. R. S. Cumming // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2014. – Vol. 61. – №. 8. – P. 2779–2784.
11. Sarkar, B. C., D. Sarkar, S. Sarkar, and J. Chakraborty, "Studies on the dynamics of bilaterally coupled X-band Gunn oscillators," Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 32, 149{167, 2011.
12. Sprott, J. C., Chaos Data Analyzer Package, Web address: <http://sprott.physics.wisc.edu/cda.htm>.
13. Hilborn, R. C., Chaos and Non Linear Dynamics, Oxford University Press, 2000.

15. Sprott, J. C., Chaos and Time Series Analysis, Oxford University Press, 20037
16. Strogatz, S. H., Nonlinear Dynamics and Chaos, West View Press, 2007. 42
17. Stefanidis, V., O. Tsakiridis, E. Zervas, and J. Stonham, \Design of a microwave chaotic oscillator using symmetric active load," Latest Trends on Circuit, 2010.
18. Jiang, T., S. Qiao, Z.-G. Shi, L. Peng, J. Huangfu, W.-Z. Cui, W. Ma, and L.-X. Ran, \Simulation and experimental evaluation of the radar signal performance of chaotic signals generated from a microwave Colpitts oscillator," Progress In Electromagnetics Research, Vol. 90, 15{30, 2009.
19. Nikishov, A. Y., \Generation of the microwave chaotic oscillations by CMOS structure," PIERS Proceedings, 457{461, Moscow, Russia, Aug. 18{21, 2009.
20. Dmitriev, A. S., A. V. Kletsov, and L. V. Kuzmin, \Experimental generation of chaotic oscillations in microwave band by phase-locked loop," PIERS Proceedings, 1498{1502, Moscow, Russia, Aug. 18{21, 2009.
21. Ульянов Д.В. исследование влияния магнитного поля и оптического излучения на режим работы синхронизированного генератора на диоде ганна Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2000. 113 с Трубачев А.А. Генераторно-преобразовательные устройства свч и квч Диапазонов на диодах ганна, Томск – 2016

**ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ
ПІКІРІ**

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Ербақыт Клара

5B071900- Радиотехника, электроника және телекоммуникация

**Тақырыбына: Ганн диоды негізіндегі генераторлардың жұмысына,
оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу**

Ербақыт Клара дипломдық жұмыста Ганн диодындағы генератордың құрамына кіретін элементтердің сызықты емес сипатын ескере отырып, тек бір тізбекті схемаларды қарастырды және әртүрлі жеңілдететін болжамдар арқылы шешімдер қабылдады. Дипломдық жұмыс келесі бөлімдерден тұрады:


Бірінші бөлімде Ганн диодтарындағы аса жоғары жиілікті құрылғылардың параметрлік сипаттамалары және олардың түрлері теориялық тұрғыдан зерттелді.

Екінші бөлімде синхронды сигнал мен жүктеме параметрлерінің өзгеруі нәтижесінде генераторда болып жатқан процестерді, сондай-ақ сыртқы өрістер мен сәулеленулердің әсерін жоғары сенімділік деңгейімен модельдеуге мүмкіндік беретін Ганн диодында синхрондалған АЖЖ-ті генератор (ГДСГ) моделі жасалды. Математикалық модель негізінде генератордың жұмыс режимдері дифференциалды теңдеулермен сипатталды.

Үшінші бөлімде X-диапазондағы Ганн генераторында тербелістердің пайда болуына қатысты бақылаулар эксперименттік тұрғыдан орындалды. Генератордың резонаторында әлсіз жоғары жиілікті өрісінің болуы ГГ-ның динамикасын айтарлықтай өзгертетіні анықталды. Дипломдық жұмыс тапсырмасында қойылған барлық тапсырмалар толықтай орындалды.

Студент Ербақыт Клара дипломдық жұмысты жазу барысында жетекші нұсқаулығымен өз бетінше жұмыс істеу қабілетін көрсетті. Дипломдық жұмыс "92/А/өте жақсы" деп бағаланды, ал студент Ербақыт Клара 5B071900 - «Радиотехника, электроника және телекоммуникация» мамандығы бойынша техника және технологиялар бакалавры біліктілігіне сай.

Ғылыми жетекші
ЭТжҒТ каф. PhD докторы,
қауымдастырылған профессор

 Н.К. Смайлов
«24» 05 2022 ж.

СЫН – ПІКІР
дипломдық жұмыс

Ербақыт Клара

5B071900- Радиотехника, электроника және телекоммуникация

Тақырыбына: **Ганн диоды негізіндегі генераторлардың жұмысына, оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу**

Орындалды:

- а) графикалық бөлімі _____ бет;
б) түсіндірме жазбасы _____ бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Ербақыт Клара дипломдық жұмыста Ганн диодындағы генератордың құрамына кіретін элементтердің сызықты емес сипатын ескере отырып, тек бір тізбекті схемаларды қарастырды және әртүрлі жеңілдететін болжамдар арқылы шешімдер қабылдады. Дипломдық жұмыс келесі бөлімдерден тұрады:

Бірінші бөлімде зерттелген ғылыми жұмыстың негізгі тақырыптары мен бағыттары анықталды. Бұл жобада кәсіби әдебиеттерден үзінділер келтірілген.

Екінші бөлімде математикалық модель негізінде Ганн диодындағы синхрондалған генератордың жұмыс режимдерін зерттелді.

Үшінші бөлімде Ганн диодындағы генератордың сұлбадық моделі MATLAB R2015B базасындағы Simulink графикалық және математикалық модельдеу ортасында зерттелді.

Бұл дипломдық жұмыс жоғарғы оқу орындарының талаптарына сай жеткілікті жоғары дәрежеде жазылған, алынған нәтижелер ақпаратты өңдеп тарату технологиялардағы ғылыми бағытқа жауап береді.

Жұмыс бағасы

Жалпы, дипломдық жұмыс "92/A/ өте жақсы" деген бағаға, ал студент **Ербақыт Клара** 5B071900 - РЭТ мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавр» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

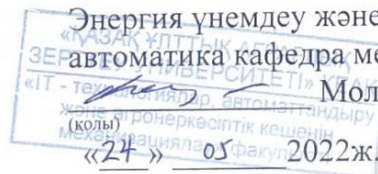
Сын – пікір беруші

ҚазҰАЗУ. доктор PhD,

Энергия үнемдеу және

автоматика кафедрасы меңгерушісі

Молдажанов А. К.



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Ербақыт Клара

Тақырыбы: Ганн диоды негізіндегі генераторлардың жұмысына, оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0.6

Әріптерді ауыстыру: 15

Аралықтар: 0

Шағын кеністіктер: 0

Ақ белгілер: 8

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні 21.05.2022

Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ербақыт Клара

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Ганн диоды негізіндегі генераторлардың жұмысына, оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 0

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 15

Интервалы: 0

Белые Знаки: 8

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

21.05.2022
Дата

Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ербакыт Клара

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Гани диоды негізіндегі генераторлардың жұмысына, оптикалық сәулеленудің әсерін зерттеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 0

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 15

Интервалы: 0

Белые Знаки: 8

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

21.05.2022
Дата

Наркысқа С

проверяющий эксперт