МІНІСТЕРСТВООСВІТИІНАУКИУКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙНАЦІОНАЛЬНИЙТЕХНІЧНИЙУНІВЕРСИТЕТ

Направахрукопису

ФУРМАНОВАНАТАЛІЯІВАНІВНА

УДК

МАТЕМАТИЧНЕТАПРОГРАМНЕЗАБЕЗПЕЧЕННЯАВТОМАТИЗОВАНОГОСИНТЕЗУТОПОЛОГІЙ

МІКРОСМУЖКОВИХФІЛЬТРІВНВЧ

Спеціальність–Системиавтоматизаціїпроектувальнихробіт

ДИСЕРТАЦІЯ

наздобуттянауковогоступеня

кандидататехнічнихнаук

Науковийкерівник

ФарафоновОлексійЮрійович

кандидаттехнічнихнаукдоцент

Запоріжжя–



ЗМІСТ

ПЕРЕЛІКУМОВНИХСКОРОЧЕНЬ…………………………………… 

ВСТУП…………………………………………………………………………… 

АНАЛІЗМОЖЛИВОСТЕЙСИНТЕЗУФІЛЬТРІВЗУРАХУВАННЯМ

МІКРОСМУЖКОВОЇТОПОЛОГІЇ…………… 

ПроблемасинтезуфільтрівНВЧ……………………………………… 

МожливостісучаснихСАПРдлясинтезумікросмужковихНВЧ

фільтрів…………………………………………………………………… 

Методирозв’язкуелектродинамічнихзадачдлямікросмужкових

структур………………………………………………………………… 

Електродинамічнийаналізмікросмужковихпристроїв………… 

Квазістатичнийаналізмікросмужковихфільтрів……………… 

Постановказадачдослідження………………………………………… 

ДОСЛІДЖЕННЯМЕТОДІВСИНТЕЗУТОПОЛОГІЙ

МІКРОСМУЖКОВИХНВЧФІЛЬТРІВ……………………………………… 

КласифікаціяфільтрівНВЧтазадачаоптимальногосинтезу

фільтрів……………………………………………………………………… 

Синтезполіноміальнихфільтрів……………………………………… 

Синтезфільтрівзаамлітудночастотноюхарактеристикою………… 

Фільтринижніхчастот…………………………………………… 

Фільтриверхніхчастот…………………………………………… 

Смугопропускаючіфільтри……………………………………… 

Смугозагороджуючіфільтри……………………………………… 

Моделітаметодищовикористовуютьсяпросинтезітопологій

мікросмужковихструктур……………………………………………… 

МоделюваннявідкритогокінцяМСЛ…………………………… 

Моделюваннярозривулінії……………………………………… 

Моделюваннявідрізкузв’язанихліній…………………………… 

Моделюваннявідрізкуізстрибкоподібноюзміною

ширини……………………………………………………………



Моделюваннявідрізкузплавноюзміноюширини……………… 

МоделюваннярозгалуженняМСЛ………………………… 

Моделюванняповоротулініїнадовільнийкут………………… 

Моделюванняотворіввекрануючомушарі……………………… 

МоделюванняотворіввМСЛ……………………………… 

Моделюваннятрикутнихрезонаторів…………………………… 

Прикладимоделюваннямікросмужковихфільтрів…………………… 

Методпроектуванняфільтрівнарезонаторахшпильковоготипу… 

Висновки…………………………………………………………… 

РОЗРОБКАМАТЕМАТИЧНОГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯСИНТЕЗУ

ТОПОЛОГІЙМІКРОСМУЖКОВИХФІЛЬТРІВНВЧНАОСНОВІ

КВАЗІСТАТИЧНОГОАНАЛІЗУ…………………………………………… 

Використаннягенетичногоалгоритмупошукурішеньдля

розв’язкузадачіоптимізації………………………………………… 

Удосконаленняметодупошукурішеньдлярозв’язкузадачі

оптимізаціїзвикористаннямгенетичногоалгоритмушляхом

попередньоїкластеризації……………………………………………… 

Виконаннярозпаралелюванняобчисленьпідчассинтезу

топологіймікросмужковихфільтрів…………………………………… 

Розпаралелюванняобчисленьпідчассинтезутопологій

мікросмужковихфільтрівзадопомогоюквазістатичного

аналізу………………………………………………………………



Розпаралелюванняобчисленьпідчасоптимізаціїз

використаннямудосконаленогогенетичногоалгоритму… 

Розробленіметодитаметодикипроектуваннятопологій

мікросмужковихфільтрівНВЧ………………………………



Врахуваннязалежностіхвильовихопорівмікросмужкового

фільтравідтовщинисмужки……………………………………… 

Використанняалгоритмівдляпроектуванняфільтрівна

резонаторахшпильковоготипу…………………………………… 

Методпроектуванняфільтрівнарезонаторахтрикутного

типу………………………………………………………………… 

Методсинтезутопологійфільтрівнаосновівідрізку

одиночноїнерегулярноїлінії……………………………………… 

Методпроектуванняфільтрівнаосновіфракталів……………… 

Висновки………………………………………………………………… 

ПРОГРАМНАРЕАЛІЗАЦІЯСИСТЕМИПРОЕКТУВАННЯТОПОЛОГІЇ

МІКРОСМУЖКОВИХНВЧФІЛЬТРІВ……………………………………… 

ВимогидосистемипроектуваннятопологіймікросмужковихНВЧ

фільтрів…………………………………………………………………… 

Архітектурарозробленоїавтоматизованоїсистемисинтезутопологій

фільтрівНВЧ…………………………………………………………… 

ОсновніхарактеристикисистемипроектуваннятопологійНВЧ

фільтрів………………………………………………………………… 

Проектуванняфільтрівусередовищіприкладиреалізації…… 

Висновки…………………………………………………………… 

ВИСНОВКИ……………………………………………………………………… 

СПИСОКВИКОРИСТАНИХДЖЕРЕЛ……………………………………… 

ДодатокАЗагальнийалгоритмроботисистемисинтезутопологій

мікросмужковихфільтрівНВЧ………………………………………………… 

ДодатокББлоксхемаалгоритмусинтезуФНЧврозробленійсистемі

синтезутопологіймікросмужковихфільтрівНВЧ…………………………… 

ДодатокВБлоксхемаалгоритмусинтезуФВЧврозробленійсистемісинтезутопологіймікросмужковихфільтрівНВЧ……………………………



ДодатокГ–БлоксхемаалгоритмусинтезуСПФврозробленійсистемі

синтезутопологіймікросмужковихфільтрівНВЧ…………………………… 

ДодатокД–БлоксхемаалгоритмусинтезуСЗФврозробленійсистемі

синтезутопологіймікросмужковихфільтрівНВЧ…………………………… 

ДодатокК–Активпровадженнярезультатівроботи………………………… 



ПЕРЕЛІКУМОВНИХСКОРОЧЕНЬ

АЧХ амплітудночастотнахарактеристика

БЕ базовийелемент

ГА генетичнийалгоритм

ГЧЗ груповийчасзатримки

ДЗС дефективназаземлюючаструктура

ДМС дефективнамікросмужковаструктура

ЕМ Електромагнітний

ЕОМ електроннообчислювальнамашина

ІС інтегральнасхема

НВЧ надвисокічастоти

НЛП нерегулярналініяпередачі

НЧ нижнічастоти

РЕА радіоелектроннаапаратура

САПР системаавтоматизованогопроектування

СЗФ смугозагороджуючийфільтр

СОКК самоорганізаційнакартаКохонена

СПФ смугопропускаючийфільтр

ФВЧ фільтрверхніхчастот

ФЗЗ фотонназабороненазона

ФНЧ фільтрнижніхчастот

ФЧХ фазочастотнахарактеристика

ЧСП частотноселективнийпристрій

ЧХ частотнахарактеристика



ВСТУП

АктуальністьтемиРозвитокімініатюризаціяелементноїбазинадвисокочастотноїтехнікивимагаєістотногозменшеннярозмірівічастотноселективнихпристроївЧСПОднимізшляхіввирішенняцієїактуальноїзадачієзамінапорожнистиххвилеводнихструктурнасмужковітамікросмужковіструктуриОбластізастосуваннямікросмужковихлінійпередачібезперервнорозширюютьсязавдякинетількиістотноменшимгабаритамівазіпристроївалеітехнологічностіатакождешевизнііможливостівиготовленнянапідкладкахцілихвузлівімодулівОднакмікросмужковимлініямпередачііпристроямнаїхосновіпритаманнідеякінедолікивпорівняннізхвилеводамивнихсуттєвобільшвисокіпогоннівтратитруднощіточногоаналізупристроїввідкритийхарактерлінійневиключаєможливістьелектромагнітнихзвязківміжелементамисхемиЯквідомочастотноселективніпристроїєнайважливішимиелементамитехнікизвязкутарадіолокаціїНерідковідЧСПзалежатьтакінайважливішіпараметриапаратуривціломуякчутливістьзавадостійкістьнадійністьгабаритивагаПостійнатенденціядопідвищенняфункціональноїскладностііступеняінтеграціївисокочастотнихпристроївпоставилапереддослідникамивційобластіпроблемурозробкиоптимальнихконструкційнадвисокочастотнихНВЧфільтрівзізбереженнямїхосновнихперевагмініатюрностіінадійностіОднаквзвязкузособливостямипоширенняелектромагнітниххвильвмікросмужковихлініяхвиникаютьзначнітруднощіприаналізіконструкційнаїхосновііособливоприпроведеннісинтезупристроївнамікросмужковихлініях

РозробкоюмікросмужковихфільтрівврізнірокизаймалисьвітчизнянітазакордоннівченіВВКонінВВТюрнєвЛМКарпуковНДМалютінАААлександровськийААБеляєвІНПрудиусВІОборжицькийАСПетровВДРазевігВЮПотаповААКурушинОВАлексєєвВЮПриходькотаін

ВданийчасєобширналітературазтеоріїтаметодівсинтезурізнихтипівфільтрівНВЧРозробленіметодисинтезубагатьохструктурфільтрівНВЧнаприкладнаосновіфільтрівпрототипівнижніхчастотсхідчастихтрансформаторіввикористаннічастотногоперетворенняРічардсадозволяютьсинтезуватиЧСПзвисокоюточністюелектричнихпараметрівхвильовіопоруелектричнідовжини–ОднакприпереходівіделектричнихпараметрівфільтрадогеометричнихпараметрівтопологіївиникаютьпевнітруднощіповязанізнедостатньоюточністюіснуючихмоделейвідрізківлінійпередачірізнихнеоднорідностейатакожзпроблемамиоблікудисперсіївпливукорпусупровідностіматеріалупровідниківтощоособливоуверхнійчастиніНВЧдіапазонуЦепризводитьдонеобхідностіекспериментальноговідпрацюваннятопологіїнамакетахфільтрівЗпоявоюпрограмнихпродуктівщодозволяютьвиконуватианалізтопологіїпристроївНВЧнаелектродинамічномурівніситуаціязміниласяЗявиласяможливістьтакзмоделюватитопологіюпроектованогофільтрущобекспериментальнахарактеристикадобрезбігаласязрозрахунковою

СинтезмікросмужковогофільтраНВЧтрадиційнимспособомможезайнятизначнийчасприцьомуможливістьфізичноїреалізаціїрозробленогоЧСПнезможебутивизначеназмоментупочаткуроботидорозрахункугеометричнихпараметрівКрімтогоіснуючіметодикидозволяютьреалізуватифільтрилишенадобревідомихрезонуючихструктурахвтойчасяксинтезфільтрівнасучаснихтопологічнихрішенняхвикликаєтруднощі

ВтойжечаснезважаючинавеликукількістьробітприсвяченихпроектуваннюмікросмужковихконструкційтапакетівпрограмдляїхмоделюваннятааналізунасьогоднівідсутніпрограмищодозволяютьпроводитисинтезмікросмужковихфільтрівщобазуєтьсянаквазістатичномуаналізітопологіїзвикористаннямрезонаторнихструктурщоактивновикористовуютьсяприпроектуваннісучаснихЧСПсередякихслідвиділитиодиночнітазв’язанімікросмужковілініїшпильковірезонаторитрикутнірезонаторидефективнізаземлюючіструктуридефективнімікросмужковіструктуривідрізкинерегулярнихлінійзісхідчастимабоплавнимпереходомтаін

Узв’язкузвеликоюкількістюваріантівконструктивноговиконання–таскладнимиметодикамирозрахункумікросмужковихфільтрівНВЧїхпроектуванняєскладноюзадачею

ТомувданійдисертаційнійроботіздійснюєтьсяпорівняннярізноманітнихконструкційфільтрівнамікросмужковихлініяхзметоювиборунайбільшперспективниханалізуютьсяметодисинтезуЧСПНВЧдіапазонувиконуєтьсярозробкаметодикиточногорозрахункугеометричнихрозмірівтопологіїфільтрівотриманихврезультатісинтезузвикористаннямквазістатичногоаналізупропонуютьсямоделітаалгоритмисинтезумікросмужковихНВЧфільтрів

ІнтегруючиінженерніметодикивєдинусистемурозробкифільтрівнеобхідноуніфікуватиїхіпредставитиувидісукупностіблоківпідпрограмзоднотипнимивхіднимиданимиірезультатамищопредставляютьсяудеякомустандартномувидіРозв’язуючицюзадачубудедостатньолегкоорганізуватисинтездляфільтрівзрізнимиамплітудночастотнимихарактеристикамиСтворенняіаналізінженернихметодикзїхподальшоюалгоритмізацієюдозволяєвпритулнаблизитисядостворенняСАПРфільтрівНВЧдіапазонуЧимбільшукількістьінженернихметодиквдастьсяуніфікуватитимбільшавірогідністьсинтезуоптимальногозточкизорувведенихпочатковихумовфільтраНВЧдіапазонуВищесказанедаєпривідзробитивисновокщопоставленазадачаєактуальною

Зв’язокроботизнауковимипрограмамипланамитемами

ДисертаційнароботавиконанаврамкахнауководосліднихробітщовиконувалисьнакафедріІнформаційнітехнологіїелектроннихзасобівЗапорізькогонаціональноготехнічногоуніверситету

 РозробкаметодівпроектуваннярадіоелектроннихапаратівзурахуваннямфункціональнихконструктивнихітехнологічнихобмеженьУчастьавтораполягалаудослідженнівпливунавихідніфункціїрадіоелектроннихапаратівфункціональнихконструктивнихітехнологічнихобмеженьдослідженняхвильовихопорівмікросмужковихсмугопропускаючихфільтрівтаурозробціметодівутвореннямоделейврахуванняфункціональнихконструктивнихітехнологічнихобмеженьнавихідніфункціїрадіоелектроннихапаратіврозробкамоделейдляоптимізаціїмікросмужковихсмугопропускаючихфільтрів

 РозробкаметодівпроектуваннярадіоелектроннихапаратівзвикористаннямінформаційнихтехнологійУчастьавтораполягалавдослідженніметодикпроектуваннятаоптимізаціїНВЧфільтрівтаоцінціїхточності

 Об’єктноорієнтованіметодипроектуваннярадіоелектроннихапаратівАвторомрозробленіметодисинтезутопологіймікросмужковихсмугопропускаючихфільтрівнарезонаторахшпильковоготипутатрикутнихрезонаторахвдосконаленііснуючіметодикипроектуваннятарозробленаметодикапроектуванняфільтрівнаділянкахзв’язанихлінійзпрямокутнимиотворамивекрануючомушарі

МетоюдисертаційноїроботиєпідвищенняефективностіпроектувальнихробітшляхомрозробленняметодівсинтезутаалгоритмівсистемиавтоматизованогосинтезутопологіймікросмужковихфільтрівНВЧ

Длядосягненняпоставленоїметинеобхіднорозв’язатитакізадачі

– проаналізуватиіснуючіметодисинтезумікросмужковихфільтріввідмітитиїхособливостітавизначитиобластіможливогозастосування

– дослідитиконструкціїмікросмужковихфільтрівНВЧреалізованихнарізнихрезонаторнихструктурахвизначитиперспективніконструкціїзточкизорутехнологічностівиготовленняможливостімініатюризаціїпокращеннячастотниххарактеристик

– розглянутиіснуючіпакетиСАПРмікросмужковихпристроївпроаналізуватиможливістьсинтезуфільтрівНВЧ

– розробитиметодипроектуваннямікросмужковихфільтрівнарезонаторнихструктурахякінемаютьточнихалгоритміврозрахункутаметодикищоуточнюютьіснуючіметодирозрахункугеометричнихрозмірівтопологіїмікросмужковихфільтрів

– розробитиструктуруописатиалгоритмисистемипроектуваннямікросмужковихфільтрівНВЧзапропонуватиспособиоптимізаціїпроцесусинтезу

Обєктдослідження–процессинтезутопологіїмікросмужковихфільтрівНВЧзазаданимивихіднимиданимиособливостямичастотниххарактеристикгабаритнимирозмірамиплатиматеріаломпідкладки

Предметдослідження–методимоделііалгоритмипроектуванняконструкційфільтрівНВЧвмікросмужковомувиконаннісинтезтопологіймікросмужковихфільтрівзвикористаннямквазістатичноготаелектродинамічногометодів

Методидослідження–теоріядовгихлінійіметодианалізумікросмужковихструктуруквазістатичномунаближеннірозрахункизанаближенимиметодикаминаосновіапроксимаційнихформулзвикористаннямЕОМчисельніметодимоделюванняметодколокаціїквазістатичнийаналізметоддекомпозиціїметодгенетичногоалгоритмупошукумінімумувикористаннястатистичнихтаекспериментальнихданихузагальненнярезультатів

Науковановизнаотриманихрезультатів

 РозробленометодсинтезуСПФнарезонаторахшпильковоготипуззтакимиособливостямиякщілинавекрануючомушаріфрактальнареалізаціятанепаралельністьділянокзв’язанихлінійМетоддозволивотриматифільтризшириноюсмугипропусканнявідвузькоїдопонадширокоїтапокращитипридушенняпаразитнихсмугпропусканняусмузізагородженняскоротитичаспроектуванняСПФнашпильковихрезонаторахізабезпечитипроцедурусинтезувавтоматичномурежимідляреалізаціївСАПР

Удосконаленометодпошукурішеньдлярозв’язкузадачіоптимізаціїшляхомпроведенняпочатковоїкластеризаціїзвикористаннямсамоорганізаційнихкартКохоненапередвиконаннямпошукумінімумугенетичнималгоритмомТакийпідхіддемонструєбільшточнірезультатисинтезутопологійтадаєможливістьзначноскоротитивитратичасузавдякиможливостірозпаралелюванняобчисленьнарізнихкластерах

ВпершезапропонованометодсинтезутопологійфільтрівнавідрізкахнерегулярнихлінійдляякихнемаєточнихметодикрозрахункуПрицьомуотриманіврезультатіпроектуванняфільтримаютьтакіперевагиякмініатюрністьможливістьвидаленнядругогопаразитногорезонансумайженадвіоктавипідвищенавласнадобротністьпершогоробочогорезонансу

Запропонованометодсинтезутопологіймікросмужковихфільтрівнатрикутнихрезонаторахзвикористаннямквазістатичногоаналізутопології

ЗапропонованометодикусинтезутопологіймікросмужковихфільтрівзфрактальноюреалізацієюрезонаторівщоробитьможливимпроектуваннямікросмужковихфільтрівпринеобхідностіотриманнядвохсмугпропусканнязагородженнятакщобдругасмугапропусканнязагородженнямалацентральнучастотунижчезаТакожфрактальнагеометріяприпроектуваннімікросмужковихфільтрівможезастосовуватисядлязниженнярівняпаразитнихсмугприцьомутакерішенняконструкціїфільтравідрізняєтьсявідсутністюнеобхідностізбільшеннягабаритнихрозмірівфільтравцілому

Практичнезначенняотриманихрезультатів

Впершерозробленометодикуякадозволяєвиконатирозрахунокгеометричнихрозмірівділянкизв’язанихлінійзпрямокутнимотворомвекрануючомушаріпіднеющобазуєтьсянаквазістатичномуаналізіпоперечногоперерізумікросмужковоїтопологіїігенетичномуалгоритміпошукурішень

Уточненометодикипроектуванняфільтрівзавдякивикористаннюквазістатичногоаналізуприпроведеннісинтезутопологійфільтріввтомучислідлямікросмужковихфільтрівназв’язанихлініяхзотворамивекрануючомушарі

ПроаналізованозалежністьхвильовихопорівмікросмужковогофільтравідтовщинисмужкипобудованономограмудлявизначенняоптимальноїтопологіїзурахуваннямтовщинимікросмужковоїлініїрезультатианалізузведеніумасивякийвикористовуєтьсяврозробленійсистемісинтезутопологіймікросмужковихфільтрівВиконанопроектуванняСПФнашпильковихрезонаторахзотворамивекрануючомушаріпідділянкамизв’язанихліній

ЗапропонованоалгоритмидлясистемипроектуваннямікросмужковихфільтрівНВЧщоміститьусобівеликукількістьтопологічнихрішеньдлякожноготипуфільтрів

ПроаналізованозалежністьвластивостейчастотниххарактеристикфільтрівпобудованихнавідрізкунеоднорідноїмікросмужковоїлініївідйогогеометричнихрозмірівасамедовжиниізмінишириниСтворенобазуданихщовикористовуєтьсяврозробленійсистемисинтезутопологіймікросмужковихфільтрів

РозробленоалгоритмиіструктуруСАПРмікросмужковихфільтрівщодозволяєсинтезуватитопологіїфільтрівіззаданимихарактеристикамизвикористаннямквазістатичногоаналізу

БуловпровадженометодсинтезутопологійсмугопропускаючихфільтрівнарезонаторахшпильковоготипузіщілиноювекрануючомушарівикористаннядосконаленогометодупошукурішеньзадачіоптимізаціїзвикористаннямгенетичногоалгоритмушляхомпопередньоїкластеризаціїтасистемусинтезутопологіймікросмужковихфільтріввпроцесмодернізаціївузлаИПС

РозробленоівпровадженоунавчальнийпроцессистемуавтоматизованогопроектуваннямікросмужковихфільтрівНВЧщодозволяєвиконуватисинтезфільтрівзауточненимитарозробленимиметодикамирозрахункущобазуєтьсянаквазістатичномуаналізітопологіїфільтратапроведеннібагатопараметричноїоптимізаціїзагенетичнималгоритмомпошукурішень

ОсобистийвнесокздобувачаВсіосновніположеннящостановлятьсутьдисертаціїотриманіздобувачемсамостійноВроботахопублікованихвспівавторствіздобувачевіналежатьстворенняметодикипроектуваннятааналізумікросмужковихфільтрівнашпильковихрезонаторахзотворамивекрануючомушарідослідженнявпливутовщиниМСЛнапараметрифільтрівдослідженнявпливунеоднорідностівекрануючомушаріувидіотворунапараметрифільтразвикористаннямквазістатичногоаналізутопологіїпроведенняоцінкиможливостейіснуючихСАПРщовикористовуютьрізніметодианалізуприпроектуванніфільтрівзотворамивекранідослідженняособливостеймоделюванняперемичокувідгалужувачахЛангеформуванняметидослідженьтаперевіркаотриманихданихзадопомогоюелектромагнітногоаналізудосліджуванихструктураналізнеоднорідностіувидіповоротуМСЛвфільтрахнарезонаторахшпильковоготипудослідженнявпливуособливостейтопологіїСПФнашпильковихрезонаторівувиглядінепаралельнихділянокзв’язанихлінійнайогочастотніхарактеристикипослідовністьоптимізаційнихрішеньдлятопологіїфільтрівзметоюзменшеннявтратметодикасинтезусмугопропускаючихфільтрівнатрикутнихрезонаторахзалежністьчастотниххарактеристикмікросмужковихфільтрівзфрактальноюреалізацієюрезонаторіввідкількостіітераційвикористанняпаралельнихобчисленьприпроведенніквазістатичногоаналізумікросмужковихпристроїввикористаннякартКохоненадляпопередньоїкластеризаціївгенетичнихалгоритмахтаперевірказапропонованогоудосконаленогометодупошукурішеньметодпроектуванняфільтрівнавідрізкунерегулярноїлініїзсинусоїдальноюзміноюширинизвикористаннямквазістатичногоаналізу

РеалізаціярезультатівроботиРозробленасистемапроектуваннявпровадженавпроцеспроектуваннямікросмужковихфільтрівНВЧказенногопідприємстваНВКІскраТОВНПФВестЛабсЛтдівнавчальнийпроцесЗапорізькогонаціональноготехнічногоуніверситету

АпробаціярезультатівдисертаціїОсновніположенняірезультатидисертаційноїроботидоповідалисьіобговорювалисьна

– міжнароднихнауковотехнічнихконференціяхСучасніпроблемирадіоелектронікителекомунікаційкомпютерноїінженеріїмЛьвів–смтСлавськеУкраїнарр

– міжнароднихнауковопрактичнихконференціяхСучасніпроблемиідосягненнявгалузірадіотехнікителекомунікаційтаінформаційнихтехнологійРТТмЗапоріжжяУкраїнарр

– міжнароднихКримськихконференціяхНВЧтехнікатателекомунікаційнітехнологіїКриМіКомСевастопольАРКримУкраїнарр

– міжнародномуомумолодіжномуфоруміРадіоелектронікаімолодьвХХІстмХарківУкраїнар

– науковотехнічнійконференціїФізикаелектронікаелектротехнікамСумиУкраїнар

– науковотехнічнійконференціїІнформатикаматематикаавтоматикамСумиУкраїнар

ПублікаціїЗатемоюдисертаціїопублікованодрукованихпрацьзнихстатейуспеціалізованихфаховихнауковихвиданняхУкраїнипублікаційуматеріалахконференційтатезахдоповідейп’ятьпрацьбезспівавторів

СтруктурадисертаціїДисертаційнароботаскладаєтьсяізвступучотирьохрозділіввисновківіспискулітературнихджерелназвЗагальнийобсягроботистановитьсторінокзнихдрукованоготекстуРоботаміститьрисункаітаблиць

УвступіобґрунтованоактуальністьтемисформульованометуроботизадачідослідженнявизначенонауковуновизнудисертаційноїроботитапрактичнуцінністьотриманихрезультатівНаведеноструктуруроботивідомостіпропублікаціїапробаціютавпровадженнярезультатівроботи

УпершомурозділірозглянутііснуючіметодикисинтезумікросмужковихфільтрівтааналізупристроївНВЧдіапазонуособливуувагуприділеноелектродинамічномутаквазістатичномуметодаманалізуДослідженіможливостісучаснихСАПРмікросмужковихпристроїввобластісинтезуфільтрівможливостейіточностіаналізутопологійкласичнихісучаснихконструкційфільтрівВизначенощонайбільшточнірезультатиприпроведенніаналізутопологіймікросмужковихфільтрівотриманізвикористаннямсистемищотакожмаєможливістьоптимізаціїаналізованихконструкційНедолікамисистемиможнавважативідсутністьблокусинтезумікросмужковихфільтрівтабібліотекиосновнихелементівфільтрівумікросмужковомувиконанні

СередіншихрозглянутихсистемслідвиділитиякиймаємодульрозрахункуфільтрівпобудованихзвикористаннямблоківпротеїхкількістьобмеженавідсутняможливістьдоповненнябібліотекиаприпроектуваннітопологіїфільтразадопомогоюграфічногоредакторастворенняконструкціїфільтразнерегулярнимилініямиєнеможливимІншимнедолікомєзначнівитратичасуприпроведеніаналізуструктуритавідсутністьблокусинтезу

Такимчиномпостаєзадачарозробкисистемисинтезумікросмужковихфільтрівщобазуєтьсянавикористаннітрадиційнихметодиктаквазістатичномуаналізітопологійщоматимевбудованийконструктортопологійзможливістюдодаванняновихбазовихелементівматимеможливістьоптимізаціїтапроведеннясинтезу

ПроведенооглядіснуючихметодівтаметодикпроектуваннямікросмужковихфільтрівНВЧРозглянутоособливостіметодівквазістатичноготаелектродинамічногоаналізутаобластіїхзастосуванняПоказаноперевагиквазістатичногоаналізудляпроведеннясинтезуконструкціймікросмужковихфільтрівзвикористаннямрізнихрезонаторнихструктурВизначенощометодисинтезуфільтрівзвикористаннямфільтрівпрототипівнижніхчастотдаєнайбільшточнірезультатипротеможебутиуточненийзадопомогоюквазістатичногоаналізуПершийрозділзакінчуєтьсяформулюваннямметидисертаційноїроботиізадачдослідженняпоставленозадачірозробкиуточненихметодикпроектуваннямікросмужковихфільтрівстворенняалгоритмівсинтезуфільтрівзавихіднимихарактеристикамизвикористаннямквазістатичногоаналізутопології

УдругомурозділірозглянутометодитаметодикипроектуванняякіуможливлюютьсинтезфільтріввизначеноможливістьїхзастосуваннядляпроектуванняЧСПнарізнихрезонаторнихструктурахДляцьогопроведеноаналізіснуючихконструкціймікросмужковихфільтріввиконанихзвикористаннямрезонаторнихструктуррізнихтипівСпираючисьнаоглядлітературизтематикидисертаційноїроботитадослідженнярозробоквітчизнянихпідприємстввизначенінайбільшрозповсюдженітатехнологічновідпрацьованіконструкціїфільтрівтавизначеноперспективнітопологічнірішеннящозабезпечуютьзменшеннягабаритнихрозмірівпокращенняпозасмуговиххарактеристиктощоДляпроведеннядослідженьточностіметодудекомпозиціїзподальшимквазістатичниманалізомтопологіїбулообранонаступніконструкціїмікросмужковихфільтрів

– трифільтранижніхчастотнамікросмужковійлініїзіступінчатоюзміноюхвильовогоопорунашпильковомурезонаторізіступінчатимопоромнаосновівідрізканерегулярнійлінії

– одинфільтрверхніхчастотФВЧнавідрізкахлінійкороткозамкненихнакінціірозривахвосновнійлініїпередачі

– п’ятьсмугопропускаючихфільтрівнапаралельнихзв’язанихлініяхгопорядкунапаралельнихзв’язанихлініяхгопорядкузотворамивекрануючомушаріпідділянкамизв’язанихлінійнашпильковихрезонаторахгопорядкуСПФнашпильковихрезонаторахгопорядкузотворамивекрануючомушаріСПФнатрикутнихрезонаторахгопорядку

– трисмугозагороджуючихфільтранапідключенихчвертьхвильовихвідгалуженняхлінійпередачіщовключаютьвузькийіширокийпровідникинаділянкахзв’язанихлінійуякиходинізвідрізківМСЛкороткозамкнутийнакінціСЗФнакільцевомурезонаторі

Обраніконструкціїбулопроаналізованозадопомогоюдекомпозиційногометодувизначеноможливістьпроектуванняокремихділянокзадопомогоюіснуючихметодиксинтезуфільтрів

РозглянутіконструкціїфільтрівхарактеризуютьсязначноюваріативністюувиборірезонаторнихструктурізабезпечуютьреалізаціюзаданихчастотниххарактеристикЧастиназнихмаєширокозастосовуваніметодикипроектуванняпротевикористанняквазістатичногоаналізутопологіїдозволилоуточнитипараметриелементівтопологіїдляотриманнячастотниххарактеристикщобільшточновідповідаютьзаданимДляіншихконструкційтакихякфільтриназв’язанихлініяхтафільтринарезонаторахшпильковоготипузотворамизапропонованоуточненіметодикипроектуваннящовраховуютьнеоднорідністьструктуриувиглядіпрямокутногоотворувекрануючомушаріпідкладки

ВокремугрупувинесенітопологіїякінемаютьописанихулітературіметодикрозрахункуаїхпроектуваннябазуєтьсянапроведенихстатистичнихданихфільтрнатрикутнихрезонаторахіфільтрнавідрізкуНЛППоставленозадачурозробкиметодикипроектуванняфільтрівнанеоднорідностяхтакихтипів

ВизначенометодикуобчисленняматриціщодаєможливістьзастосуванняквазістатичногоаналізудляпроведеннясинтезутопологіймікросмужковихфільтрівНВЧЗапропонованометодикуаналізупристроївНВЧзотворамивекрануючомушарідляоднотабагатошаровихпідкладокРозрахованізначенняємностейнеоднорідностейможутьвикористовуватисьдляуточненогоаналізуфільтрівнаМСЛ

Запропоновановикористанняметодуколокаційдляобчисленняматричнихелементівщодаєможливістьвведенняелементівтрикутноїформиврезультатічогопокращуєтьсяапроксимаціядеякихнекоординатнихтопологій

Запропонованомоделюванняфільтрівнарезонаторахтрикутноготипушляхомпопередньогопроведенняквазістатичногоаналізутастворенняматриціємностейнеоднорідностейзвикористаннямметодуколокаціїщодозволяємоделюватирізнітипифільтрівнатрикутнихрезонаторахатакожсинтезуватиїх

Розробленометодпроектуваннямікросмужковихсмугопропускаючихфільтрівнарезонаторахшпильковоготипущодозволяєотриматифільтризшириноюсмугипропусканнявідвузькоїдопонадширокоїтапокращитипридушенняпаразитнихсмугпропусканняусмузізагородження

Утретьомурозділірозробленометодикуякадозволяєвиконатирозрахунокгеометричнихрозмірівділянкизв’язанихлінійзпрямокутнимотворомвекрануючомушаріпіднеющобазуєтьсянаквазістатичномуаналізіпоперечногоперерізумікросмужковоїтопологіїігенетичномуалгоритміпошукурішень

Проаналізованозалежністьхвильовихопорівмікросмужковогофільтравідтовщинисмужкипобудованономограмудлявизначенняоптимальноїтопологіїзурахуваннямтовщинимікросмужковоїлініїрезультатианалізузведеніумасивякийвикористовуєтьсяврозробленійсистемісинтезутопологіймікросмужковихфільтрів

Удосконаленометодпошукурішеньдлярозв’язкузадачіоптимізаціїшляхомпроведенняпочатковоїкластеризаціїзвикористаннямсамоорганізаційнихкартКохоненапередвиконаннямпошукумінімумугенетичнималгоритмомТакийпідхіддемонструєбільшточнірезультатисинтезутопологійтадаєможливістьзначноскоротитивитратичасузавдякиможливостірозпаралелюванняобчисленьнарізнихкластерахКрімтогорозглянутоізапропонованошляхиприскоренняобчисленьзадопомогоюпаралельноговиконанняопераційприпроведеннірозрахункуоберненоїматрицітазадопомогоюрозподіленняобчисленьдлявиконаннянарізнихпроцесорахабоЕОМщодаєможливістьскоротитичассинтезутаоптимізаціїна

Проаналізованозалежністьширинисмугипропусканнявідкутаміжнепаралельнимиділянкамизв’язанихлінійвСПФнашпильковихрезонаторахрезультатизведенодомасивущовикористовуєтьсяврозробленійсистеміавтоматизованогосинтезтопологіймікросмужковихліній

ВпершезапропонованометодсинтезутопологійфільтрівнавідрізкахнерегулярнихлінійдляякихнемаєточнихметодикрозрахункуПрицьомуотриманіврезультатіпроектуванняфільтримаютьтакіперевагиякмініатюрністьможливістьвидаленнядругогопаразитногорезонансумайженадвіоктавипідвищенавласнадобротністьпершогоробочогорезонансу

Проаналізованозалежністьвластивостейчастотниххарактеристикфільтрівпобудованихнавідрізкунерегулярноїлініїпередачівідйогогеометричнихрозмірівасамедовжиниізміниширини

ЗапропонованоалгоритмидлясистемипроектуваннямікросмужковихфільтрівНВЧщоміститьусобівеликукількістьтопологічнихрішеньдлякожноготипуфільтрівтаалгоритмщовключаєвсеберозрахунокгеометричнихрозмірівпоперечногоперерізутопологіїмікросмужковогоСПФнашпильковихрезонаторахзотворамивзаземлюючомушаріщобазуєтьсянаквазістатичномуаналізіпоперечногоперерізумікросмужковоїтопологіїтагенетичномуалгоритміпошукурішень

ЗапропонованометодсинтезутопологіймікросмужковихфільтрівзфрактальноюреалізацієюрезонаторівщоробитьможливимпроектуваннямікросмужковихфільтрівпринеобхідностіотриманнядвохсмугпропусканнязагородженнятакщобдругасмугапропусканнязагородженнямалацентральнучастотунижчезаТакожфрактальнагеометріяприпроектуваннімікросмужковихфільтрівможезастосовуватисядлязниженнярівняпаразитнихсмугприцьомутакерішенняконструкціїфільтравідрізняєтьсявідсутністюнеобхідностізбільшеннягабаритнихрозмірівфільтравцілому

Запропонованометодсинтезутопологіймікросмужковихфільтрівнатрикутнихрезонаторахзвикористаннямквазістатичногоаналізутопології

Проаналізованозалежністьхвильовихопорівнавідрізкахзв’язанихмікросмужковихлінійзотворамивекрануючомушарівідтовщиниметалізаціїстворенономограмурезультатиякоїможутьвикористовуватисьдлясинтезутопологійфільтрів

УчетвертомурозділіописуєтьсясистемапроектуваннямікросмужковихфільтрівщобазуєтьсянавикористанніметодівсинтезузафільтрамипрототипаминижніхчастоттеоріїдовгихлінійтаквазістатичномуаналізітопологіїПроаналізовановимогидорозроблюваноїсистемипроектуваннявизначеноможливімодулісистеми

Запропонованоструктурупрограмивизначенозв’язкиміжокремимиелементамиНаосновіаналізуобмеженьщодофізичнотатехнологічнореалізуємихпараметрівелементіврезонаторнихструктуртаметодикпроектуваннясформованіточністніхарактеристикисистемипроектуванняПроведенооцінкушвидкодіїроботисистемипроектуваннявзалежностівідзадачщорозв’язуютьсяПоказанозастосуваннярозробленоїсистемипроектуваннянаприкладісинтезутопологіймікросмужковихсмугопропускаючихфільтрів

РезультатироботипідтвердженіекспериментальноіактамивпровадженняякінаведенівДодаткуК

ВИСНОВКИ

ВдисертаційнійроботірозглянутоіснуючіметодисинтезуфільтріввизначеноможливістьїхзастосуваннядлярізнихвидіврезонаторнихструктурПроведенооглядіснуючихтрадиційнихтасучаснихконструкціймікросмужковихфільтріввиконаноїхкласифікаціюзавидомАЧХтарезонанснимиструктурамищовикористовуютьсявнихЗначнакількістьзапропонованихконструкційдозволяєпокращитипозасмуговіхарактеристикифільтрівзнизитирівеньпаразитнихсмугпропусканняБазовийелементщопредставляєсобоюділянкузв’язанихлінійзпрямокутноющілиноювекрануючомушарідозволяєрозширитисмугупропусканняСПФприцьомупокращуютьсязначеннянаправленостіташирокосмуговості

ВизначенометодикуобчисленняматриціщодаєможливістьзастосуванняквазістатичногоаналізудляпроведеннясинтезутопологіймікросмужковихфільтрівНВЧЗапропонованометодикуаналізупристроївНВЧзотворамивекрануючомушарідляоднотабагатошаровихпідкладокРозрахованізначенняємностейнеоднорідностейможутьвикористовуватисьдляуточненогоаналізуфільтрівнаМСЛЗапропоновановикористанняметодуколокаційдляобчисленняматричнихелементівщодаєможливістьвведенняелементівтрикутноїформиврезультатічогопокращуєтьсяапроксимаціядеякихнекоординатнихтопологій

ЗапропонованомоделюванняфільтрівнарезонаторахтрикутноготипушляхомпопередньогопроведенняквазістатичногоаналізутастворенняматриціємностейнеоднорідностейщодозволяємоделюватирізнітипифільтрівнатрикутнихрезонаторахатакожсинтезуватиїхВідрізкинерегулярнихлінійописаніякбазовіелементидляпроектуванняфільтрівірозглянутізадопомогоюквазістатичногоаналізуЦедаєможливістьсинтезуватитопологіїфільтрівдляпроектуванняякихнемаєточнихметодикрозрахунку

Розробленометодпроектуваннямікросмужковихсмугопропускаючихфільтрівнарезонаторахшпильковоготипущодозволяєотриматифільтризшириноюсмугипропусканнявідвузькоїдопонадширокоїтапокращитипридушенняпаразитнихсмугпропусканняусмузізагородження

Впершерозробленометодикуякадозволяєвиконатирозрахунокгеометричнихрозмірівділянкизв’язанихлінійзпрямокутнимотворомвекрануючомушаріпіднеющобазуєтьсянаквазістатичномуаналізіпоперечногоперерізумікросмужковоїтопологіїігенетичномуалгоритміпошукурішень

ПроаналізованозалежністьхвильовихопорівмікросмужковогофільтравідтовщинисмужкипобудованономограмудлявизначенняоптимальноїтопологіїзурахуваннямтовщинимікросмужковоїлініїрезультатианалізузведеніумасивякийвикористовуєтьсяврозробленійсистемісинтезутопологіймікросмужковихфільтрівВиконанопроектуванняСПФнашпильковихрезонаторахзотворамивекрануючомушаріпідділянкамизв’язанихліній

Удосконаленометодпошукурішеньдлярозв’язкузадачіоптимізаціїшляхомпроведенняпочатковоїкластеризаціїзвикористаннямсамоорганізаційнихкартКохоненапередвиконаннямпошукумінімумугенетичнималгоритмомТакийпідхіддемонструєбільшточнірезультатисинтезутопологійтадаєможливістьзначноскоротитивитратичасузавдякиможливостірозпаралелюванняобчисленьнарізнихкластерах

Проаналізованозалежністьширинисмугипропусканнявідкутаміжнепаралельнимиділянкамизв’язанихлінійвСПФнашпильковихрезонаторахрезультатизведенодомасивущовикористовуєтьсяврозробленійсистеміавтоматизованогосинтезтопологіймікросмужковихліній

ВпершезапропонованометодсинтезутопологійфільтрівнавідрізкахнерегулярнихлінійдляякихнемаєточнихметодикрозрахункуПрицьомуотриманіврезультатіпроектуванняфільтримаютьтакіперевагиякмініатюрністьможливістьвидаленнядругогопаразитногорезонансумайженадвіоктавипідвищенавласнадобротністьпершогоробочогорезонансу

ПроаналізованозалежністьвластивостейчастотниххарактеристикфільтрівпобудованихнавідрізкунерегулярноїмікросмужковоїлініївідйогогеометричнихрозмірівасамедовжиниізмінишириниЗапропонованометодикупроектуванняфільтрівнижніхчастоттасмугозагороджуючихфільтрівнавідрізкунеоднорідноїМСЛтопологіяякогоописуєтьсясинусоїдамидовжиноюπзвикористаннямствореноїбазиданих

РозглянутоможливістьсинтезуфільтрівнаосновівідрізкунерегулярноїлініїпередачіВизначенощозбільшеннябазовогоелементуувидівідрізкунерегулярноїлініїзсинусоїдальноюформоюпровідникадлязміницентральноїчастотиСПФнезавждидаєбажанийрезультатщоможебутипоясненорозузгодженнямхвильовихопорівзміноюнетількипараметрівелементівсхемизаміщенняайланокеквівалентноїсхемиСтворенобазуданихдевякостібазовогоелементувиступаєвідрізокнерегулярноїлініїформаякогоописуєтьсясинусоїдою

ВикористаннярезультатіваналізудозволяєсинтезуватифільтринанерегулярнихлініяхауточненнягеометричнихрозмірівтопологіївідбуваєтьсязадопомогоюгенетичногоалгоритмупошукурішеньРозробленометодсинтезуфільтрівнавідрізкунерегулярноїлініїщобазуєтьсянапопередньомурозрахункузаметодикамидляфільтрівнижніхчастотзіступінчатоюзміноюхвильовогоопорутаквазістатичномуаналізі

ЗапропонованоалгоритмидлясистемипроектуваннямікросмужковихфільтрівНВЧщоміститьусобівеликукількістьтопологічнихрішеньдлякожноготипуфільтрівЗапропонованоалгоритмщовключаєвсеберозрахунокгеометричнихрозмірівтопологіїфільтрівназв’язанихнапівхвильовихрезонаторахнаосновіфільтрівпрототипівнижніхчастотзавідомимиметодикамипроведеннярозрахунківгеометричнихрозмірівпоперечногоперерізутопологіїмікросмужковогоСПФнашпильковихрезонаторахзотворамивзаземлюючомушарізадопомогоюпідпрограмищобазуєтьсянаквазістатичномуаналізіпоперечногоперерізумікросмужковоїтопологіїтагенетичномуалгоритміпошукурішеньЦедозволяєспроститипроектуваннямікросмужковихСПФнашпильковихрезонаторахзотворамивзаземлюючомушаріякібазуютьсяназв’язанихлініях

ЗапропонованометодикусинтезутопологіймікросмужковихфільтрівзфрактальноюреалізацієюрезонаторівщоробитьможливимпроектуваннямікросмужковихфільтрівпринеобхідностіотриманнядвохсмугпропусканнязагородженнятакщобдругасмугапропусканнязагородженнямалацентральнучастотунижчезаТакожфрактальнагеометріяприпроектуваннімікросмужковихфільтрівможезастосовуватисядлязниженнярівняпаразитнихсмугприцьомутакерішенняконструкціїфільтравідрізняєтьсявідсутністюнеобхідностізбільшеннягабаритнихрозмірівфільтравцілому

Запропонованометодсинтезутопологіймікросмужковихфільтрівнатрикутнихрезонаторахзвикористаннямквазістатичногоаналізутопології

РозробленосистемуавтоматизованогосинтезутопологіймікросмужковихфільтрівщомаєпростуструктуруіможевзаємодіятизіншимиСАПРНВЧпристроївВзапропонованійСАПРвпершереалізованонаступніфункції

– автоматизованийсинтезтопологіїфільтрівзавимогамидоамплітудночастотноїхарактеристикизвикористаннямрізнихрезонуючихструктурвтомучислі–натрикутнихрезонаторахінавідрізкахнерегулярнихліній

– автоматизованийвибірконструкціїфільтравзалежностівідчастотниххарактеристиктаперевагкористувача

Проведеноаналізбазовихтопологічнихелементівнаякихможебутивиконаноконструкціюфільтрівтавстановленообмеженнязумовленіможливостямифізичноїтатехнологічноїреалізації

Впершерозробленопідпрограмуякадозволяєвиконатирозрахунокгеометричнихрозмірівділянкизв’язанихлінійзпрямокутнимотворомвекрануючомушаріщобазуєтьсянаквазістатичномуаналізіпоперечногоперерізумікросмужковоїтопологіїігенетичномуалгоритміпошукурішеньВикористанняпідпрограмидаєможливістьспроектуватиСПФзширшоюсмугоюпропусканнякращимихарактеристикамиусмузізагородженняінижчимивимогамидодопусківпривиробництвініжуСПФназв’язанихлініяхбезотворіввекрануючомушаріРозробленапідпрограматакожпродемонструвалагарнірезультатиприрозрахункуСПФнарезонаторахшпильковоготипу

РозробленасистемасинтезутопологіймікросмужковихфільтрівмаєусвоємускладідекількабібліотекданихщомістятьінформаціющодозалежностіхвильовихопорівмікросмужковогофільтравідтовщиниМСЛщодозалежностіширинисмугипропусканнявідкутаміжнепаралельнимиділянкамизв’язанихлінійвСПФнашпильковихрезонаторахщодозалежностірозміріввідрізківнерегулярноїлініївідїхгеометричнихрозмірівтаможливістьреалізаціїнаїхосновітопологійфільтрівНВЧЦедаєможливістьсинтезуватизначнукількістьтопологійфільтріввтомучислітакихдляякихнемаєточнихметодівтаметодиксинтезу

РозробленасистемасинтезутопологіймікросмужковихфільтрівмаєзручнийуроботітазрозумілийінтерфейсщозабезпечуєвисокушвидкістьосвоюванняпрограмикористувачамищомаютьвідповіднізнаннящодопроектуванняНВЧфільтрівВдалийвибірмовпрограмуванняпривівдоскороченнястроківпрограмуваннясистемипроектуваннямікросмужковихфільтрівможливостейпідключеннярозробленихмодулівСАПРнетількиостанньогопоколінняалеістворенихзначноранішеНезважаючинавикористаннярізнихмовпрограмуваннясистемамаєдоситьвисокушвидкодіюзавдякиоптимальномуподілублоківпрограмизметоюмінімальноївзаємодіїміжнимиівикористаннюмовпрограмуваннящозабезпечуютьвисокушвидкістьобчислень

ПроведенооцінкушвидкодіїроботисистемисинтезутопологійфільтрівНВЧузалежностівідзадачщорозв’язуютьсяВикористаннярозпаралелюванняшляхомобчисленнярізнихтопологічнихрішеньпідчассинтезуфільтрівнаокремихпроцесорахзменшуєтривалістьрозрахунківнаупорівняннізпослідовнимвиконаннямобчисленьбезвикористаннярозподіленнязадач

ПоказанозастосуваннярозробленоїсистемипроектуваннянаприкладісинтезумікросмужковогоСПФнарезонаторахтрикутноготипутаСЗФнавідрізкунерегулярноїмікросмужковоїлініїРезультатироботипідтвердженіекспериментальноіактамивпровадження

РезультативиконанихдослідженьвпровадженовпрактикупроектуванняелектроннихапаратівКПНВКІскраівикористовувалисьдляудосконаленняпристроївщорозробляютьсянапідприємствіЗапропонованіметодисинтезувпровадженоувиробництвоТОВНПФВестЛабсЛтдНауковітапрактичнірезультатидисертаційноїроботивикористовуютьсявнавчальномупроцесідлястудентівЗапорізькогонаціональноготехнічногоуніверситетуздисциплін“МатематичнемоделюваннявСАПР”напряму“Радіоелектронніапарати”і“КонструкціїпристроївНВЧ”спеціальності“Виробництвоелектроннихзасобів”Результатидослідженьвикористовуютьсяудипломномупроектуванні