

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ

МИРЗАЕВ АВАЗ ЭГАМБЕРДИЕВИЧ

СПЛАЙН-ФУНКЦИЯЛАР АСОСИДА СИГНАЛЛАРНИ РАҚАМЛИ
ИШЛАШ АЛГОРИТМЛАРНИ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ

05.01.04-Ҳисоблаш машиналари, мажмуалари ва компьютер тармоқларининг математик ва дастурий таъминоти

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент-2019

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертация автореферати мундарижаси**

**Оглавления автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on
technical sciences**

Мирзаев Аваз Эгамбердиевич

Сплайн-функциялар асосида сигналларни рақамли ишлаш алгоритмларни самарадорлигини ошириш.....3

Мирзаев Аваз Эгамбердиевич

Повышение эффективности алгоритмов цифровой обработки сигналов на основе сплайн функций.....21

Mirzaev Avaz Egamberdievich

Improving the efficiency of digital processing algorithms based on spline functions.....39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works.....43

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ

МИРЗАЕВ АВАЗ ЭГАМБЕРДИЕВИЧ

СПЛАЙН-ФУНКЦИЯЛАР АСОСИДА СИГНАЛЛАРНИ РАҚАМЛИ
ИШЛАШ АЛГОРИТМЛАРНИ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ

05.01.04-Ҳисоблаш машиналари, мажмуалари ва компьютер тармоқларининг математик ва дастурий таъминоти

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент-2019

Техника фанлари бўйича фалсафадоктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.1PhD/T970 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент ахборот технологиялари университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.tuit.uz) ва «Ziyonet» Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: **Зайнидинов Хакимжон Насиридинович**
техника фанлари доктори

Расмий оппонентлар: **Мухаммадиева Дилноз Тулкуновна**
техника фанлари доктори, профессор

Қаххоров Аълохон Абровович
техника фанлари номзоди

Етакчи ташкилот: **Тошкент темир йўл муҳандислар институти**

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.T.07.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «__» _____ да соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темури кўчаси, 108-уй. Тел.:(99871)238-64-43, факс: (99871)238-65-52, e-mail:tuit@tuit.uz).

Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (____ рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темури кўчаси, 108-уй. Тел.:(99871)238-65-44).

Диссертация автореферати 2019 йил «__» _____ куни тарқатилди.
(2019 йил «__» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

Р.Ҳ.Ҳамдамов

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

Ф.М.Нуралиев

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д., доцент

М.С.Якубов

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш қошидаги илмий
семинар раиси, т.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жахонда замонавий ахборот коммуникация технологияларининг ривожланиши сигналларни тиклаш, рақамли ишлов бериш масалаларини ечишда параллел алгоритмлар яратиш, ишлов бериш жараёнларини кўп ядроли архитектура асосида амалга ошириш ва оптимал ечимлар топиш учун параллел алгоритмлар ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этмоқда. Ихтисослашган қурилмалар таркибига кирувчи ёки ҳаракатдаги объектларда жойлашган машина, комплекс ва тизимларнинг тузилиши ва ишлаш алгоритмлари ривожининг замонавий босқичи мураккаб жараён ва майдонларни тез таҳлил қилиш ва катта ҳажмдаги ахборотни реал вақтда қайта ишлаш тезлигини оширишга, жумладан, АҚШ, Россия Федерацияси, Хиндистон ва Корея Республикаларида тасвир ва сигналларга ишлов беришда замонавий усуллар, алгоритм ва структуравий воситалар, ҳисоблаш воситаларининг архитектураси ва дастурий воситалар орқали ечиш усуларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жахонда сигналларга рақамли ишлов бериш масалаларини ечишда параллел алгоритмлар яратиш ва ишлов бериш жараёнларини кўп ядроли архитектура асосида амалга оширишга қаратилган илмий тадқиқот ишлар олиб бормоқда. Бу борада, жумладан сигналларни таҳлил қилиш ва тиклаш масалаларида параллел қайта ишлаш ва сплайн функциялар усуларини такомиллаштириш, сплайнлар бўлакли функциялар синфи сифатида ҳисоблашларни камлиги, қайта ишлаш алгоритмларининг мослашувчанлиги, оптимал дифференциал ва экстремал хоссалари, параметрларни ҳисоблашнинг соддалиги, хатоларнинг яхлитлашга таъсир даражасининг пастлиги туфайли дастурий ва аппарат воситаларини яратишга йўналтирилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда, маълумотларга тезкор ишлов бериш, сигналларни рақамли ишлаш алгоритмларини самарадорлигини ошириш ва сигналларни локал хусусиятларини аниқлашга мўлжалланган усул, алгоритм, аппарат ва дастурий воситаларни ишлаб чиқиш долзарблигича қолмоқда.

Республикамизда автомобиль саноати ривожини учун ахборот коммуникация технологияларини тадбиқ этилиб, ишлаб чиқариш самарадорлигини ошириш учун ҳисоблаш тизимлари қуришда параллел алгоритмлар қўллаш чора тадбирлари амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...йўл-транспорт, муҳандислик-коммуникация ва ижтимоий инфратузилмаларни лойиҳалаш ҳамда модернизация қилиш, ... информацион-коммуникацион технологияларни жорий этиш»¹ вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга оширишда, жумладан, сигналларга рақамли ишлов беришда кўпядроли

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги фармони

процессорлар учун параллел алгоритмлар яратиш, кубик ва бикубик сплайнлар асосидаги махсус процессорлар структураларининг моделларини ишлаб чиқиш муҳим масалалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ва 2017 йил 12 декабрдаги ПФ-5278-сон «Аҳолига давлат хизматлари кўрсатишнинг миллий тизимини тубдан ислоҳ қилиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Фармонлари, Вазирлар Маҳкамасининг 2017 йил 15 сентябрдаги 728-сон «Ўзбекистон Республикаси ягона интерактив давлат хизматлари портали орқали электрон давлат хизматлари кўрсатиш тартибини такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу тадқиқот муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги кунгача тасвирлар билан ишлаш, геофизик ва сейсмик сигналларга рақамли ишлов беришнинг усул ва алгоритмлари ишлаб чиқиш бўйича илмий ва амалий натижалар олинган. Жумладан, математик моделлаштириш масалалари - Г.И.Марчук, Ю.Н.Субботин, В.А.Василенко, сплайнлар назарияси ечимлари - Ю.С.Завялов, С.Ф.Свиньин, С.Б.Стечкин, М.Исроилов, Х.Шодиметов, В.Л.Мирошниченко, махсус процессорлар архитектураларини моделлари ва лойиҳаларини ишлаб чиқиш - А.И.Гребенников, Б.И.Красов, О.Зенкевич, Дж.Фикс, К.деБор, Г.Стренг, шунингдек М.М.Камилов., Т.Ф.Бекмурадов., М.Мусаев., А.Имамов, Х.Н.Зайнидинов ва бошқа олимлар илмий ишларида кўриб чиқилган.

Махсус процессорларнинг жадвал-алгоритмик структураларини яратиш усуллари, сплайнлар назарияси асосларини биргаликда қўллаш, самарадорлиги ва аниқлиги юқори бўлган усуллар яратиш, сигналларга рақамли ишлов бериш, ҳамда тиклаш учун параллел ҳисоблаш дастурий ва аппарат воситалар яратиш муаммолари етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент ахборот технологиялари университети илмий-тадқиқот ишлари режасининг №ЁФ4-001-«Сплайнлар асосида сигналларни ишлаш аппарат дастурий тизимлар яратишнинг назарий-услубий асослари» (2014), №Ф4-021-«Бўлак-полиномиал базисларда товушни қайта ишлаш ва тиклаш интеллектуал-дастурий техник тизимларини яратишнинг назарий методологикасослари» (2012-2016) ва №БА-А5-021-«Сейсмик сигналларни қайта ишлаш ва вейвлет-тахлил қилиш учун

махсулаштирилган тизим яратиш» (2016-2018) мавзусидаги лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кубик ва бикубик сплайнлар ёрдамида функционал боғланишларни рақамли ишлаш алгоритмларининг самарадорлигини ошириш усулларини яратиш ва дастурий таъминотини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

функциялар ва тажрибадан олинган функционал боғланишларни яқинлаштириш усулларини тадқиқ қилиш ва танлаб олинган сигналлар синфи учун оптимал усулни аниқлаш;

сигналларни рақамли ишлашда кўпядроли процессорлар учун параллел алгоритмлар яратиш;

кубик ва бикубик сплайнлар асосидаги махсус процессорлар структураларининг моделларини ишлаб чиқиш;

бир ва икки ўлчовли функционал боғланишларни сплайнлар ёрдамида рақамли ишлаш жараёнларини моделлаштириш учун дастурий таъминот тузилмасини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида сигналларни қайта ишлаш жараёнларида фойдаланиладиган тажриба стендлари ва махсус процессорлар структуралари олинган.

Тадқиқотнинг предмети кубик ва бикубик сплайнлар асосида сигналларни рақамли ишлаш алгоритмлари ва усулларини ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида функционал таҳлил назарияси, сплайн функциялар ва моделлаштириш назариялари, қаторлар ва матрицалар назариялари, шунингдек, параллел ҳисоблаш назарияларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

функциялар ва тажрибадан олинган функционал боғланишларни яқинлаштириш усулларини тадқиқ қилиш натижасида танлаб олинган сигналлар синфи учун сплайн-функциялар усули аналитик таҳлил натижаси асосида такомиллаштирилган;

автомобиль қисмларини синаш жараёнидан олинган сигналларни рақамли ишлашга мўлжалланган параллел алгоритмлар ишлаб чиқилган;

кубик ва бикубик базисли сплайнлар асосида вибро сигналларни кўп ядроли процессорларда рақамли ишлашга мўлжалланган самарадор алгоритмлари яратилган;

бир ва икки ўлчовли функционал боғланишларни сплайнлар ёрдамида рақамли ишлаш жараёнларини моделлаштириш учун дастурий таъминот тузилмаси ишлаб чиқилган.

Тадқиқот амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

вибро сигналларни рақамли ишлаш учун базисли сплайнлар асосидаги ҳисоблаш структураларини моделлаштириш учун алгоритм ва дастурий восита ишлаб чиқилган;

автомобиль қисмларини синаш жараёнидан олинган сигналларни икки ўлчовли сигналларни бикубик базисли сплайнлар билан моделлаштириш учун алгоритм ва дастурий восита ишлаб чиқилган;

сигналларга бўлак-базис усулда ишлов бериш учун алгоритм ва дастур ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончилиги муаммони ўрганиш ва таҳлил қилиш натижасида сигналларга рақамли ишлов беришда соҳада қўлланилувчи ҳисоблаш тизимлари самарадорлигига қўйиладиган юқори талаблар сплайн функциялар асосида янги метод ва алгоритмлар ёки параллел-конвейерли кўппроцессорли ва кўпядроли тизимлар яратиш талабларига мослиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти сигналларни рақамли ишлашда дастурий таъминот ишлаб чиқиш учун назарий ва услубий асослар ва ахборотни хужжатлаштириш, ҳамда рақамли ишлашнинг техник тизимлари қийин формаллаштириладиган ахборот тизимларида қарорларни қабул қилишни услубиятлари билан изоҳланади;

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти вибро сигналларни рақамли ишлаш алгоритмлар асосида такомиллаштирилган ва ишлаб чиқилган дастурий мажмуа автомобил қисмларини синаш жараёни сифатини ошириш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши кубик ва бикубик базис сплайнлар ёрдамида функционал боғланишларни рақамли ишлаш жараёнларининг самарадорлигини ошириш алгоритмлари ва дастурий таъминотини ишлаб чиқиш бўйича олинган натижалар асосида:

сплайн-усуллар асосида маълумотларни рақамли ишлаш ва силлиқлаш алгоритми «GM-Uzbekistan» акциядорлик компаниясида жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 6 декабрдаги 33-8/9165-сон маълумотномаси). Натижада яратилган алгоритм ва тизим ҳисоблашларга кетадиган вақтни 12%га, натижаларни хужжатлаштириш вақтини 26%га ва хатоликларни 7-15%га қисқартиш, ишлаб чиқариш самарадорлигини 40-45%га ошириш имконини берган;

сейсмик сигналларни сплайн усулида таҳлил қилиш ва рақамли ишлашга мўлжалланган, қурилмаларнинг ишлаш жараёнида сейсмик тебранишларни назорат қилиш учун ишлаб чиқилган алгоритм «GM-Uzbekistan» акциядорлик компаниясида жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 6 декабрдаги 33-8/9165-сон маълумотномаси). Натижада ҳисоблашларга сарфланадиган вақт 14%га, натижаларни хужжатлаштириш вақтини 25%га қисқартириш имконини берган;

автомобил қисмларини синаш жараёнидан олинган вибро сигналларни кубик ва бикубик базисли сплайнлар усулда рақамли ишлаш учун мўлжалланган алгоритм «UMID UCHKUNI AUTO» маъсулияти чекланган

жамиятига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 6 декабрдаги 33-8/9165-сон маълумотномаси). Натижасида автомобил қисмларидаги носозликларни аниқлаш 15%га ошириш, дастурий таъминот ҳисоблаш жараёнлари 4-5 баробарга камайтириш имконини берган;

кубик ва бикубик базисли сплайнлар асосида вибро сигналларни кўп ядроли процессорларда рақамли ишлашга мўлжалланган самарадор алгоритм «TOP TRANSPORT TASHKENT» маъсулияти чекланган жамиятига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 6 декабрдаги 33-8/9165-сон маълумотномаси). Натижада автомобил қисмларидаги носозликларини топиш аниқлигини 18%га ошириш, натижалар аниқлиги 15%га ошириш, дастурий таъминот ҳисоблаш жараёнларига сарфланадиган вақт 2-4 баробарга камайтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари апробациядан ўтган, ҳамда 12та халқаро ва 9 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот мавзуси бўйича жами 29 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда бта мақола, 2 таси хорижий ва 4 таси республика журналларида чоп этилган ҳамда 5 та ЭҲМ учун яратилган дастурий воситаларни қайд қилиш гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулосалар, фойдаланилган адабиётлар ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 109 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация тадқиқотининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари ҳамда объект ва предметлари тавсифланган, Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияси тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқот илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини жорий қилиш рўйхати, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Функцияларни яқинлаштириш замонавий усуллари**нинг таҳлили» деб номланган биринчи бобида функцияларни яқинлаштиришда қўлланиладиган усуллари таҳлили, функционал боғланишларни бир ўлчовли сплайнлар асосида яқинлаштириш усули, функционал боғланишларни кўп ўлчовли сплайнлар асосида яқинлаштириш усуллари келтирилган.

Сигналларни рақамли ишлашнинг замонавий усуллари кўп жиҳатдан алгоритм ва структуравий воситалар, ҳисоблаш воситаларининг архитектураси ва дастурий воситаларнинг ривожига боғлиқдир.

Функцияларни жадвал кўринишдаги маълумотлар асосида функциянинг аналитик кўринишини тиклаш масаласининг энг содда ва жуда кенг қўлланиладиган кўриниши бу функцияларни интерполяциялашдир.

Классик интерполяция масаласида кўпхадлар $[a, b]$ ораликни ўзида қурилади. Тугун нуқталарни қанча кўпайтирсак яқинлашиш шунча яхши бўлади. Лекин қурилаётган кўпхаднинг даражаси тугун нуқталар сонига боғлиқ, тугун нуқталар сони ошиши билан кўпхаднинг даражаси ошиб боради ва кўпхад коэффицентларини аниқлаш учун юқори тартибли алгебраик тенгламалар системасини ечишга тўғри келади. Классик интерполяция кўпхадларни имкониятлари қисман чегараланган. Тузилган алгебраик тенгламалар системасининг сони тугун нуқталарга боғлиқ экан, тугун нуқталар ошиши билан алгебраик тенгламалар системасининг тартиби ҳам ошиб кетади. Натижада классик полиномлар қурилишида қуйидаги камчиликлар юзага келади:

интерполяция кўпхад юқори даражали бўлгани учун формула қулай эмас;

юқори даражали алгебраик тенгламалар системасини ечиш жараёнида маълум методик хатоликлар пайдо бўлади;

ҳисоблаш жараёни мураккаблашиб, натижада ҳисоблаш хатолиги қолади.

Қурилаётган кўпхад тикланаётган функцияга яхши яқинлашмаслиги мумкин. Шунинг учун, бу нуқсонлардан қутилиш мақсадида интерполяциялаш масаласида классик полиномлар ўрнига сплайн функциялар ёрдамида яқинлаштириш жуда катта имкониятларга эга бўлиб, тезда фанда ўз ўрнини топди.

Локал интерполяция сплайнлар интерполяцияланаётган объектга яхши яқинлашади ва қурилиши содда кўринишда бўлади. Қурилаётган сплайн даражаси тугун нуқталарга боғлиқ эмас. Қурилаётган сплайн функция $[a, b]$ ораликда эмас, балки $[x_i, x_{i+1}]$ $i = (\overline{0, n-1})$ ораликларда қурилади ва бу сплайн-функция ҳар бир ораликларда бир хил структурали кўпхадлардан иборат бўлади.

Классик интерполяциялашда эса бутун бир $[a, b]$ ораликда битта функция қурилар эди. Шунинг учун ҳам классик интерполяциялашга нисбатан, сплайн функциялар ёрдамида қаралган интерполяциялаш масаласининг аниқлик даражаси юқори ва қурилиши жиҳатидан ҳам содда бўлади. $[x_i, x_{i+1}]$ ($i = \overline{0, n-1}$) ораликларда қурилган силлиқ-бўлакли кўпхадли функцияларга *сплайн функциялар* дейилади.

Функцияларни интерполяциялаш масаласида классик полиномлар орқали интерполяциялаш масаласига нисбатан самарали эканлигини кўрсатди.

Полиномиал интерполяцион сплайн-функция ўзининг:

- 1) интерполяция объектига яхши яқинлашувчанлиги;
- 2) курилиши содда ва компьютер алгоритмини тузиш жуда соддалиги билан ажралиб туради.

Биз амалда учинчи даражали, яъни кубик сплайнлардан кенг фойдаланамиз. Сплайнни таърифлаш формуласида коэффициентнинг қиймати функциянинг тугунлари ва тугунлар орасидаги масофа орқали ифодаланади (1). $d = 2$ дефектли сплайнлар учун алгоритмлар мутлақо турғун саналади. Лекин $d = 1$ бўлганида силлиқловчи рекуррент сплайнлар эса барқарор эмас. Кубик В-сплайнлар қуйидагича ифодаланади.

$$B_3(x) = \begin{cases} 0, & x \geq 2, \\ (2-x)^3/6, & 1 \leq x < 2, \\ 1/6(1+3(1-x)+3(1-x)^2-3(1-x)^3), & 0 \leq x < 1, \\ B_3(-x), & x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

1- расмда битта базис сплайн келтирилган. 2- расмда эса $h=1$ ўзгармас қадамга силжитилган кубик базисли сплайнлар мажмуаси келтирилган.

3-даражали сплайнлар учун локал формулалар қуйидаги кўринишга эга:

- 3 нуқтали формула:

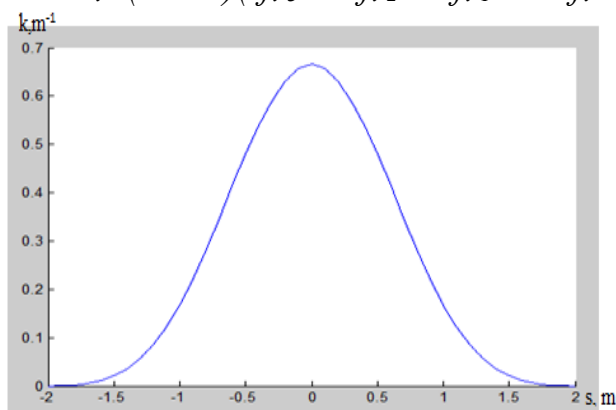
$$b_i = (1/6)(-f_{i-1} + 8f_i - f_{i+1});$$

- 5 нуқтали формула:

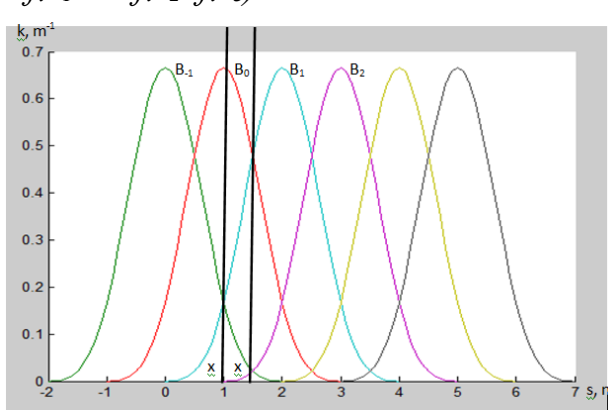
$$b_i = (1/36)(f_{i-2} - 10f_{i-1} + 54f_i - 10f_{i+1} + f_{i+2});$$

- 7 нуқтали формула

$$b_i = (1/216)(-f_{i-3} + 12f_{i-2} - 75f_{i-1} + 344f_i - 75f_{i+1} + 12f_{i+2} - f_{i+3})$$



1- расм. Кубик базисли сплайн



2- расм. Кубик базисли сплайнлар мажмуаси

$f(x)$ функцияни интерполяциялайдиган 1 дефектли m даражали $S_m(x)$ сплайн фақатгина В-сплайнлар ёрдамида йиғинди тариқасида ифодаланиши мумкин:

$$f(x) \cong S_m(x) = \sum_{i=-1}^{m+1} b_i \cdot B_i(x), \quad a \leq x \leq b, \quad (2)$$

Бу ерда b_i – коэффициентлар.

Шундай қилиб, функцияларни ва тажрибадан олинган (жадваллар кўринишдаги) маълумотларни кубик сплайнлар ёрдамида яқинлаштириш усуллари тадқиқ этиш қуйидагиларни кўрсатди:

1. Қатор масалаларни ечишда, хусусан юқори градиентли, резонанс нуқталари мавжуд бўлган функцияларни яқинлаштиришда кубик базисли сплайнларни қўллаш аниқлик бўйича бошқа кўпхадларга нисбатан яхши натижаларни беради.

2. Функцияларни ва тажрибадан олинган (жадваллар кўринишдаги) маълумотларни (2) формула ёрдамида яқинлаштиришда В-сплайнларнинг локал хоссаси намоён бўлади. Бу эса функциянинг ихтиёрий нуқтадаги қийматини фақат $m+1$ (бу ерда m сплайн даражаси) йиғиндилар кўринишида, яъни коэффициентларни базис элеменларига кўпайтмалар йиғиндилари кўринишидаги чизиқли формада ифодалаш орқали аниқлаш мумкинлигини кўрсатади. Юқорида келтирилган (2) кўпхад ҳисоблашларни параллеллаштириш ва махсус процессорларни параллеллашган архитектураларини яратишга асос бўлади.

Кейинги пайтларда кўп ўзгарувчили функцияларни яқинлаштирувчи кўп ўлчовли сплайнлар назарияси анча ривожланди. Агар фақат интерполяцион полиномиал сплайнлар соҳаси назарда тутилса, у ҳолда бир ўлчовли сплайнларни аниқлаш бир неча аргументлар ҳолатига кенгайди. Бунда $S_m(x,y)$ функция $\{x_i, y_i\}$, тўрғага нисбатан икки ўзгарувчан m даражадаги сплайн дейилади. Агар у m даражадаги полином билан тўғри тушса x ва y бўйича ҳар бир D тўғри бурчакда шундай бўлади.

Ҳар бир аргумент бўйича m тенг даражадаги кўп ўлчовли полиномиал В-сплайнлар бир ўлчовли В-сплайнларнинг тензор кўпайтмаси ҳолида аниқланади:

$$B_m(x, y, \dots, u) = B_m(x) \otimes B_m(y) \otimes \dots \otimes B_m(u)$$

Хусусан икки ўлчовли m даражадаги $S_m(x,y)$ сплайн учун:

$$S_m(x, y) = \sum \sum b_{ij} B_{m,i}(x) B_{m,j}(y),$$

формула ўринлидир.

Бу иккиламчи қисқа кўпайтмалар йиғиндисиди коэффициентлар ва бир ўлчовли В-сплайнлар маҳраж бўлади, икки ўлчамли базис сплайннинг ноль бўлмаган қийматларини аниқлашнинг

$$B(x, y) = B(x) \otimes B(y)$$

ифодаси $[x_i, x_{i+1}; y_j, y_{j+1}]$, тўғри тўртбурчак бўлиб, у тўрни қуйидагича майдалаш натижасида олинади:

$$\Delta x: x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n;$$

$$\Delta y: y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_{n-1} < y_n.$$

Шундай қилиб, бир ўлчовли сплайнларнинг локал хоссалари кўп ўлчовли сплайнлар учун тўла ёйилади. Аппроксимациянинг бир хил қадамида икки ўлчовли сплайн иккита бир ўлчовли сплайн кўринишида ифодаланиши мумкин.

Жадвал.

Функциялар яқинлаштирувчи кўпхадлар солиштирмаси

Солиштириш параметрлари	Лагранж кўпхади	Ньютон кўпхади	Сплайн
Хисоблашдаги хатолик $f(x) = \begin{cases} x^2, & x < 2 \\ \ln(x), & x \geq 2 \end{cases}$	$1,08 \cdot 10^{-8}$	$1,88 \cdot 10^{-8}$	$0,20 \cdot 10^{-8}$
Методик хатолик	$\varepsilon \leq (3/128) \max f^4(x) h^4$	$\varepsilon \leq (3/128) \max f^4(x) h^4$	$\varepsilon \leq (4/384) \max f^4(x) h^4$
Хисоблашлар сони (N=1024 4 ядроли архитектура учун)	7372	9420	4096
Интерполяция	Тенгламалар системаси ечилади	Тенгламалар системаси ечилади	Тенгламалар системаси ечилади, лекин тенглама матрицаси тўлиқ эмас 3-5-диагоналли. Уларни ечишни самарали прогон усули мавжуд
Аппроксимация	тугун нуқталар сони ошиши билан кўпхад даражаси ортади ва натижада хатолик ҳам ортиб боради.	тугун нуқталар сони ошиши билан кўпхад даражаси ортади ва натижада хатолик ҳам ортиб боради.	“Нуқтали” формулалардан фойдаланиш мумкин. Кўпхад даражаси тугун нуқталарга боғлиқ холда ошиб бормайди.

Функцияларни яқинлаштиришнинг мавжуд усуллари тахлили натижасида интерполяция масаласи кўриб чиқилиб, бунда дастлаб интерполяциялаш бу функциянинг қийматларини аргументининг жадвалда берилмаган қийматлари учун топиш деб тушунилган бўлса, ҳозирда интерполяциялаш тушунчаси жуда кенг маънода тушунилади. Шунингдек, мазкур бўлимда Лагранж интерполяцион кўпхади, Ньютон интерполяцион кўпхади, сплайн функцияларни яқинлаштириш масалалари тахлил қилинди ва сплайн функциянинг бошқа кўпхадларга нисбатан устунликлари аниқланди (Жадвалга қаранг).

Диссертациянинг «Сигналларга рақамли ишлов берувчи махсус процессорлар архитектураси» деб номланган иккинчи бобида, сигналларни рақамли ишлашнинг асосий тушунчалари, рақамли сигнал процессорларнинг

анъанавий ва кўпядроли архитектуралари, сигналларни рақамли ишлашнинг кўпядроли архитектурага мўлжалланган параллел алгоритмлари кўриб чиқилган. Ҳозирги вақтда сигналларни рақамли ишлашда қўлланилаётган мавжуд кўпгина методлар, алгоритмлар ҳамда архитектуралар тахлили, ҳамда афзаликларини ўрганиб чиқиш долзарблигича қолмоқда.

Рақамли сигнал процессорлар (РСП) (инглизча DSP - Digital Signal Processor) универсал микропроцессорлардан (МП) анча кейин пайдо бўлган. Уларнинг яратилиши сигналларга рақамли ишлов бериш (СРИБ) алгоритмларининг спецификаси билан боғлиқдир. СРИБ алгоритмларида энг кўп учрайдиган операция бу асосан кўпайтмалар йиғиндисини ҳисоблаш бўлиб, СРИБнинг таянч (базовая) операцияси деб аталади.

Биринчи бўлиб РСП дунё бозорида 80-йилларнинг бошларида пайдо бўлган. Кейинги йилларда эса Texas Instruments (TI), Freescale (Motorola), Analog Devices (ADI) каби фирмалар турли соҳалар учун РСПлар ишлаб чиқаришни узлуксиз ривожлантириб бордилар. Бугунги кунга келиб РСПлар ишлаб чиқариш технологиялари шиддат билан ривожланмоқда.

РСПларида керакли тезликка эришиш учун қуйидаги архитектуравий ечимлар амалга оширилган :

- Гарвард архитектураси. Ушбу архитектурада хотира икки соҳага ажратилган: дастур хотираси (ДХ) ва маълумотлар хотираси (МХ). Бунда хотирадан бир вақтни ўзида ҳам команда ҳам маълумот ўқилади.

- Модификацияланган Гарвард архитектураси. Ушбу архитектурада ДХ билан МХ орасида тўғридан-тўғри маълумот алмашиш имкони бор. Бу эса командаларни самарали конвейер шаклида ташкил қилишга имкон беради.

- Командаларни бир вақтда ишлаётган функционал модуллар бўйича параллеллаштириш

- Бир команда циклида бажариладиган СРИБнинг таянч (базовая) операцияларини қурилмага йўналтирилган тадбиқи.

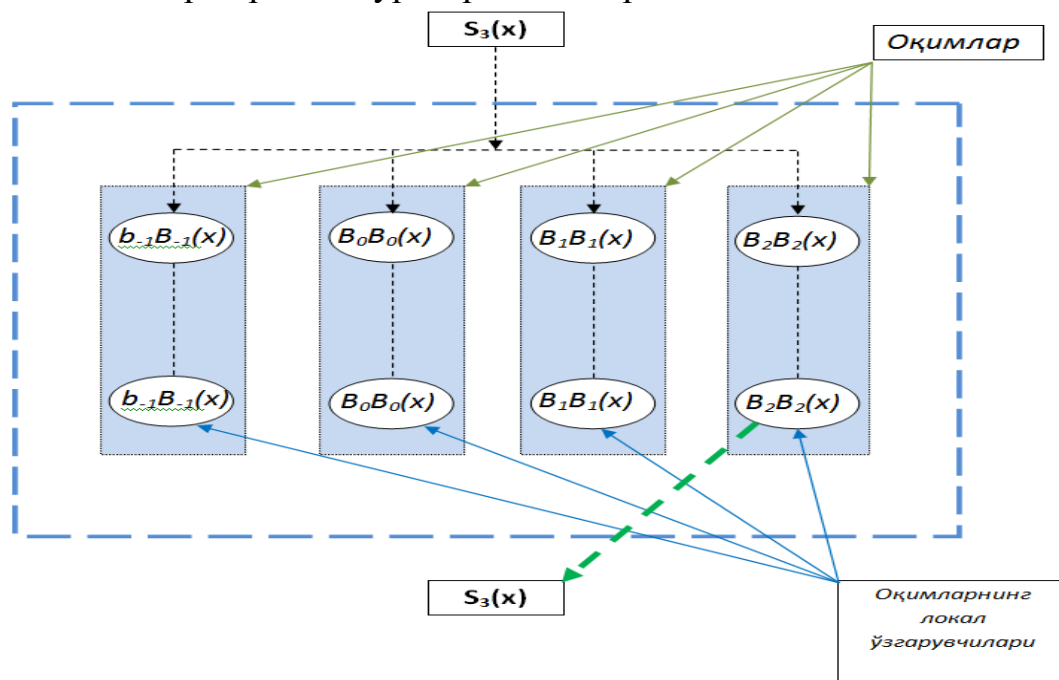
Analog Device фирмаси 2005 йилда ADSP BF 561 русумли икки ядроли РСПни ишлаб чиқара бошлади.

Микропроцессор техникасини ривожланиши кўп ядроли ва кўп процессорли архитектурадан кўп ядролига ўтишга имкон берди, бу ерда ҳар бир ядро мустақил ишловчи процессорлар функцияларини бажаради. Бу алгоритмларни тайёрлаш ва ёзиш дастурларини ишлаб чиқиш жараёнини осонлаштиради, бироқ у ҳал этилмаган вазифаларнинг ҳажмини оширишни эмас, балки параллел ҳисоблаш соҳасини кенгайтиришга имкон берди.

Кубик базисли сплайнлар ёрдамида функция ва тажрибадан олинган маълумотларни тиклаш жараёнини OpenMP ёрдамида оқимларга ажратиб, параллеллаштириш алгоритминини кўриб чиқамиз. Диссертация ишининг биринчи бобида келтирилган (2) формулани кубик базисли функция учун ёйсак, қуйидаги формула ҳосил қилинади:

$$f(x) \cong S_3(x) = b_{-1}B_{-1}(x) + b_0B_0(x) + b_1B_1(x) + b_2B_2(x)$$

Рақамли сигнал процессорларнинг анъанавий ва кўпядроли архитектуралари тахлили натижасида, сигналларни рақамли ишлашнинг кўпядроли архитектурага мўлжалланган параллел алгоритмларияратилди. Кейинги йилларда микропроцессорларнинг ривожланишида фундаментал силжиш рўй берди. Ушбу силжиш бир ядроли архитектурадан кўп ядроли архитектурага ўтиш билан характерланади. Хусусан махсус процессор архитектуралари Гарвард, Фон Нейман архитектураларидан ҳамда Блекфин, ADSP компаниялари архитектуралари кенг тарқалган.



3-расм. Тўрт ядроли архитектурада оқимларни ташкил қилиш алгоритми

Агар ҳар тўртта кўпайтириш операцияларини бажаришни параллел оқимларга ажратилса параллел алгоритмни куйидагича тасвирлаш мумкин бўлади. Ушбу алгоритмни тўрт ядроли архитектура ёрдамида амалга оширсан бўлади. Оқимлар узатилаётганда аввал кетма-кет сўнгра параллел ундан кейин эса яна кетма-кет амал бажарилади. Бу эса ҳисоблашларга кетадиган вақтни тежаш имконини беради (3-расм).

Кўп ядроли архитектурага ўтиш жараёни бир ядроли процессорларнинг баъзи технологик нормаларни пасайтириб фақат такт частотасини ошириш ҳисобига унумдорлигини ошириш имконияти физик жиҳатдан тугаганлиги натижасида пайдо бўлди. Кўп ядроли процессорларни қўллаш натижасида операцияларни бажариш жараёнларини параллеллаштириш мумкин бу эса сигналларга рақамли ишлов беришга кетадиган вақтни қисқартиришга ва умумий унумдорликни оширишга эришилади.

Диссертациянинг «**Кубик ва бикубик сплайнлар асосида сигналларга рақамли ишлов беришнинг параллел алгоритмлари**» деб номланган учинчи бобида кубик сплайнлар асосида анъанавий ва кўп ядроли махсус процессорлар архитектураси, икки ўлчовли функционал боғланишларни

тиклашда бикубик сплайнларга асосланган кўпдроли архитектуралар тавсифи берилган.

Аналитик ва жадвал кўринишда берилган экспериментал маълумотлар асосида сплайнлар қуриш масаласи b_i коэффициентларини ҳисоблаш масаласидан иборат бўлади. Умумий ҳолларда эса Δ - сплайн тўрини аниқлашдан иборат бўлади.

Локал формулалар яқинлашишнинг силлиқланиш хусусиятларини сақлаб қолади. Параметр қийматлари эса i индекси билан жорий нуқтадан етарли даражада узоқлашган нуқталардаги ҳисобга боғлиқ эмас. Улар симметрик бўлади. Лекин фақатгина соҳанинг ички нуқталари учун ишлайди.

Агарда экспериментал натижалар хатоликлар билан маълум бўлса, у ҳолда интерполяцион сплайн қуришнинг фойдаси йўқ. Бундай ҳолларда хатоликни камайтириш мақсадида силлиқловчи сплайнларни қўллаш зарурати юзага келади.

Силлиқловчи сплайн бу, интерполяциялангандан кўра «силлиқроқ» бўлган ва экспериментал қийматларга яқин жойдан ўтувчи сплайндир.

Функционални минималлаштирамиз:

$$J(f) = \int_a^b |S''(x)|^2 dx + \sum_{i=0}^N 1/R_i (f - S_i)^2, \quad (3)$$

Бу ерда $R_i > 0$ берилган катталиқ. R_i нинг коэффициенти қанчалик кичик бўлса, сплайн-функция берилган қиймат f_i га нисбатан шунчалик яқин ўтади.

Функционал (3)ни минималлаштириш учун беш диагонал матрицали чизиқли тенгламани ечиш зарур. Қурилган сплайн бўйича ортиқча кўпайтувчилар қайта ҳисобланади ва янги R_i асосида янги сплайн қурилади. Итерация жараёни сплайннинг қиймати берилган «коридор»га тўғри келгунича давом этиши керак.

Шу билан бирга қуйидаги функционални минималлаштириш керак:

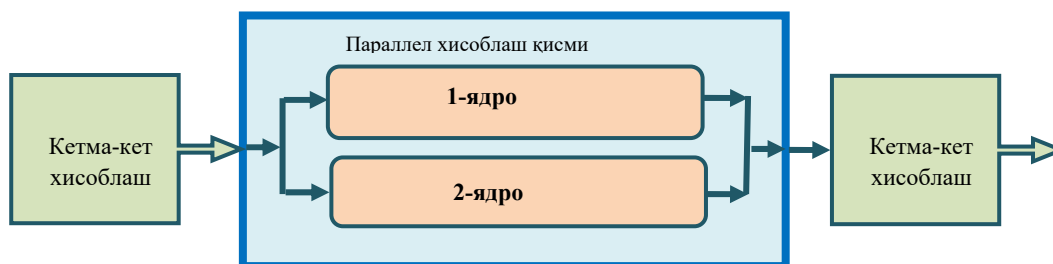
$$I(f) = \sum_{i=1}^N (f_i - S_i)^2,$$

Бу ерда S_i – сплайн функция, f_i - берилган функционал боғланиш.

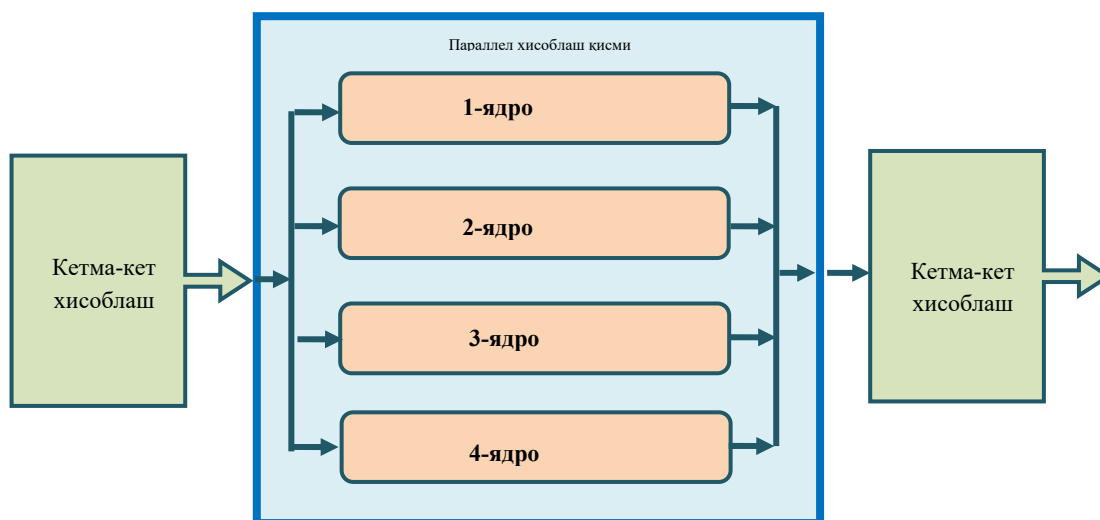
Шундай қилиб сплайнлар билан яқинлашиш коэффициентларини ҳисоблаш методларини таҳлил қилиш шунини кўрсатдики, сплайн функцияларнинг тажриба натижалари асосида қуриш муаммоси b – коэффициентларни ҳисоблаш масаласига олиб келади. Вақтнинг реал миқёсида ишловчи системалар учун коэффициентларни «нуқтали» ҳисоблаш формулалари таклиф этилади.

Шундай қилиб, структуранинг асосий афзаллиги бўлиб, жадвал-алгоритмик методлар учун амалда юқори тезкорлик ҳисобланади. Кўппроцессорли тизимлар пайдо бўлиши билан базис сплайнларнинг математик аппарати ва жадвал-алгоритм усулларини қўллаб тез ҳисоблаш

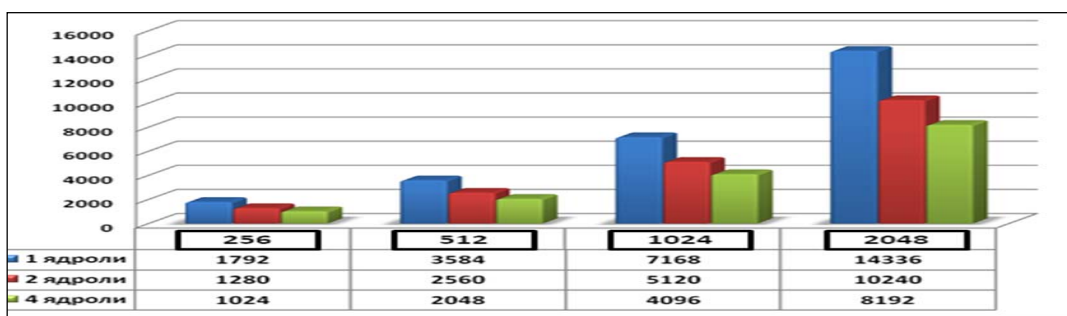
имконияти юзага келди. Негаки, B-сплайнларни ҳисоблашдаги йиғинди бир ўлчамли соҳадаги сумма $m + 1$ га тенг.



4-расм. Кубик базис сплайнли функцияларда 2 ядроли параллел ҳисоблаш структураси



5- расм. Кубик базис сплайнли функцияларда 4 ядроли параллел ҳисоблаш структураси

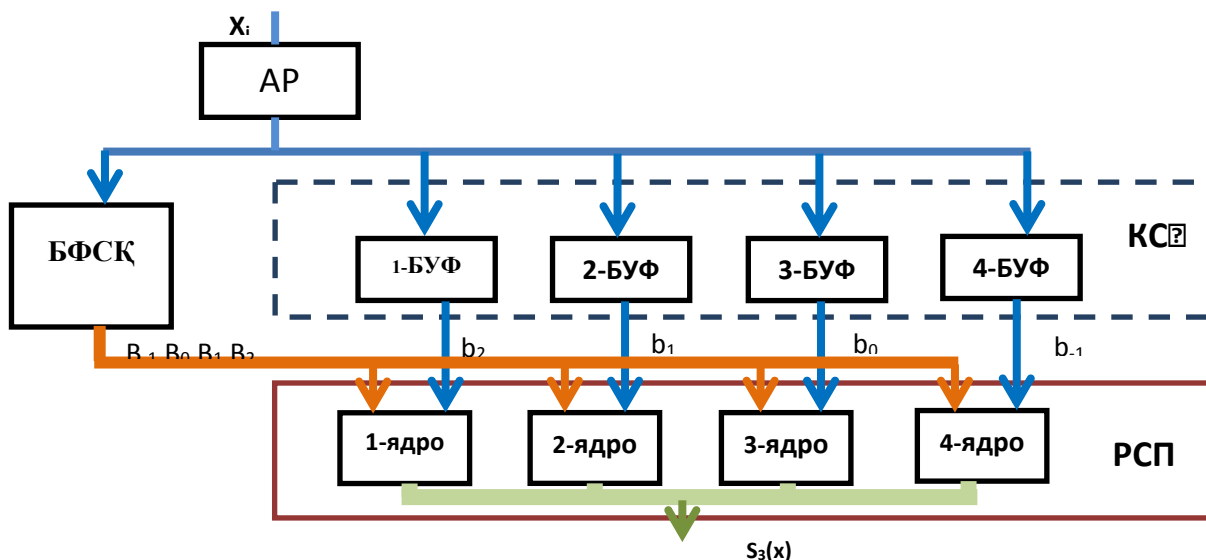


6-расм.Кубик базис сплайнли функцияларда 1,2,4 ядроли параллел ҳисоблаш структураларида ҳисоблашларнинг солиштирма графиги.

Процессорларнинг чекланган миқдоридан иборат, тежамли ҳисоблаш таркибини қуриш учун зарурлигини бикубик сплайнлар мисолида кўриш мумкин. Бир ўлчовли сплайн – функциялар тизими киритилади:

$$C_i(y) = \sum_{j=-1}^{n_2+1} b_{ij} B_j(y) \text{ бунда } i = -1, 0, 1, \dots, n + 1, \quad (4)$$

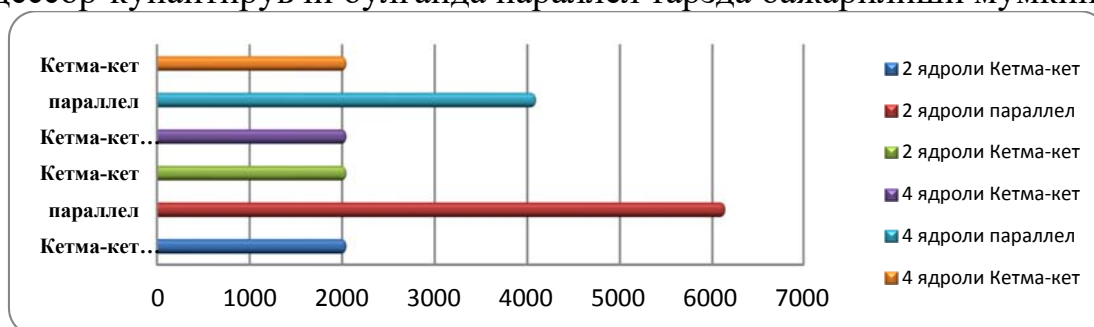
сўнгра икки ўлчовли сплайн ҳисобланади:



7- расм. Кубик базис сплайнли функцияларда аппроксимациялашни амалга ошириш учун 4 ядроли ҳисоблаш структураси

$$S_3(x, y) = \sum_{i=-1}^{n_1+1} C_i(y) B_i(y), \quad (5)$$

яъни сплайн-функцияларни ҳисоблаш бўйича операциялар кетма-кетлиги бажарилади. (4) ва (5) типдаги ўзгаришлардан ҳар бири $m+1$ процессор-кўпайтирувчи бўлганда параллел тарзда бажарилиши мумкин.



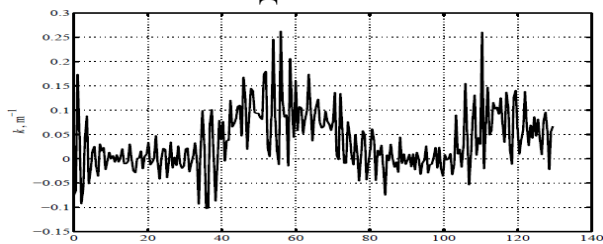
8- расм. Кубик базис сплайнли функциялар 2 ва 4 ядроли ҳисоблашнинг солиштирма графиги

Автомобил траекториясини силлиқлашнинг сплайн усули.

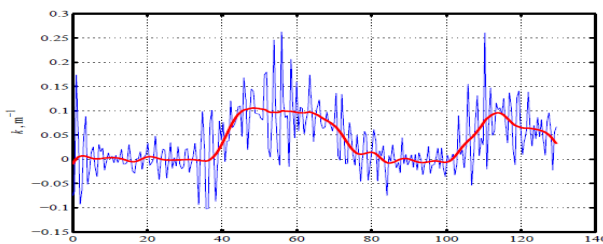
Автомобилни синаш жараёнида махсус ўлчовчи қурилма ёрдамида маълум бир йўлда ҳаракатланаётган автомобилнинг ҳолатини характерловчи S нуқталар тўплами ўлчаб олинган. Ўлчовлар тенг оралиқларда олинган бўлиб, ўлчовнинг ўртача квадратик четланиши σ тахминан 0,5-1 см га тенг. Тўпландаги нуқталар сони $n=260$, нуқталар орасидаги масофа бир хил ва $\Delta n=0,5$ м, босиб ўтилган йўл узунлиги 129,5 м. Автомобил ҳаракатланган траекториянинг максимал эгрилиги $0,11 \text{ m}^{-1}$ дан ошмаган (9-расм).

$T(S)$ ни йўл узунлиги функцияси сифатида тасвирланган графиги келтирилган, йўғон чизик эса $T(\tilde{S})$ траектория эгрилигини тасвирлайди. $T(\tilde{S})$ траектория янги \tilde{S} нуқталар тўплами бўйича қурилган ва $T(S)$ траекторияга жуда яқин ва шу билан бирга силлиқ ўзгарувчи эгриликка эга,

ҳамда эгрилик хосиласининг максимал қиймати 35 марта кичикдир. $T(\tilde{S})$ графигини аппроксимациялаш хатолигининг максимал қиймати $\delta_{\max} \approx 4,4$ мм ни ташкил этди.

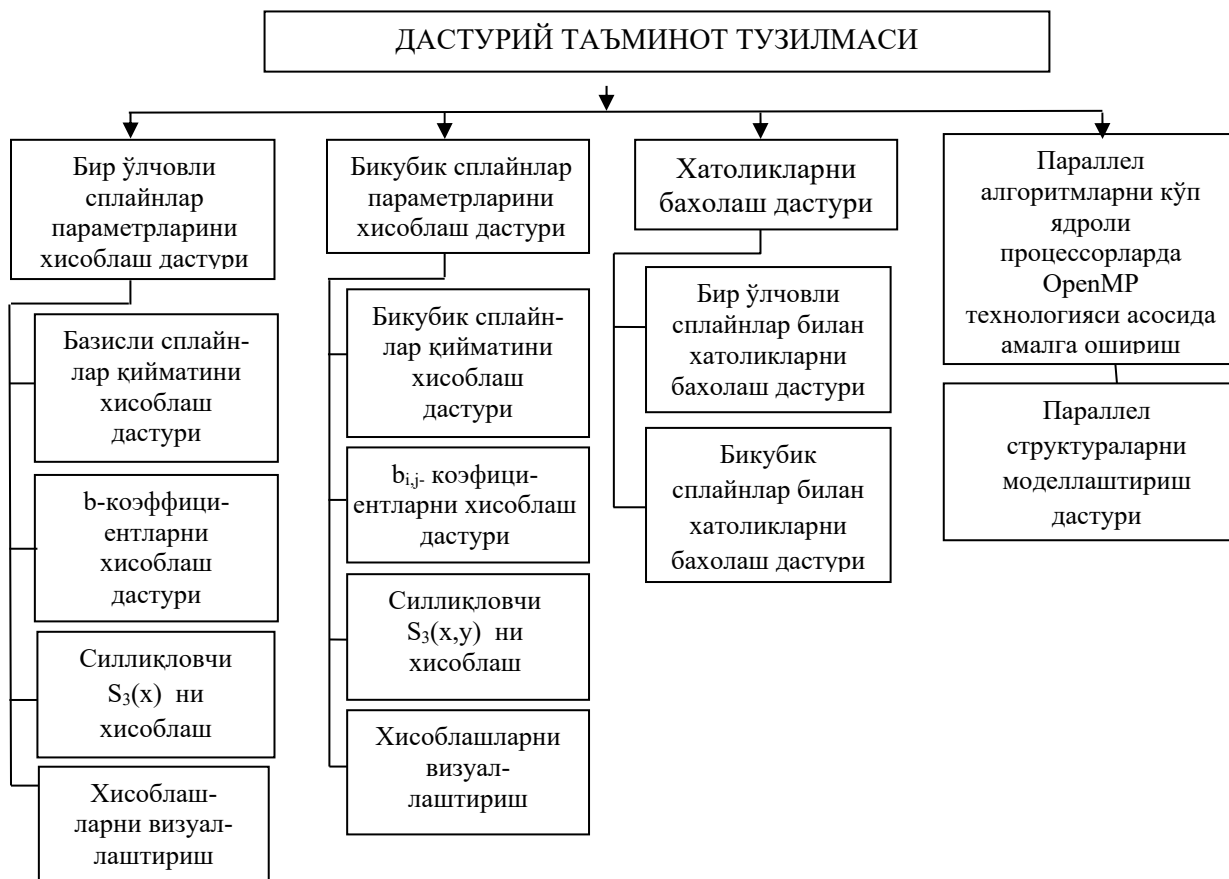


9-расм. $T(S)$ траектория эгрилиги йўл узунлиги функцияси



10-расм. Ингичка чизик билан траектория эгрилиги

Диссертациянинг “Базис сплайнларга асосланган усуллар ва махсус процессорларни моделлаштиришнинг дастурий таъминоти” деб номланган тўртинчи бобида, кубик сплайнлар асосида жадвал-алгоритмик махсус процессорнинг моделлари келтирилган.



11-расм. Дастурий таъминот тузилмаси

Кўп ядроли платформага мавжуд бўлган "битта ядроли" дастурий таъминотни кўчириш ёки янги "параллел" дастурий маҳсулотларни ишлаб чиқиш учун қулай ечимларидан бири Open Multi-Processing (OpenMP) дастурий пакети ҳисобланади. OpenMP - стандарт дастурлаш тилларида кенг тарқалган C тилида яратилган. Бу OpenMP дастурий пакетининг асосий

афзаллиги янги параллел дастурлаш тилларини кашф қилиш имконини беради.

Кўп ядроли процессорлар бозорда узоқ вақтдан бери ишламоқда, бироқ кўп ядроли процессорларнинг тўлиқ қувватидан фойдаланишлари мумкин бўлган жуда кам дастур мавжуд. OpenMP технологияси кўп ядроли процессорларнинг тўлиқ қайта ишлаш қувватига эга бўлган параллел дастурларни ишлаб чиқишга имкон беради.

ХУЛОСА

«Сплайн-функциялар асосида сигналларни рақамли ишлаш алгоритмларни самарадорлигини ошириш» мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Сплайн-усулларни тадқиқ этиш натижасида амалда фойдаланиладиган элементар функцияларнинг катта қисми базис сплайнлар ёрдамида муваффақиятли равишда яқинлаштиришусули яратилди. Бу усул базисли сплайн математик аппарат функционал боғланишларини доимий коэффициентлар ва базис функциялар кўпайтмалари қийматлари йиғиндиси кўринишида ифодалаш имконини берди.

2. Базисли сплайнлар назарияси ва жадвал алгоритмик усулларнинг имкониятлари бирикмаси натижасида юқори самарадорликка эга бўлган махсус процессорларнинг параллеллашган архитектуралари яратилди. Бу ҳисоблашларни сезиларли равишда параллеллаштириш имконини берди.

3. Кўп ядроли архитектурага ўтиш жараёни бир ядроли процессорларнинг баъзи технологик нормаларни пасайтириб фақат такт частотасини ошириш ҳисобига унумдорлигини ошириш имконияти физик жиҳатдан тугаганлиги натижасида пайдо бўлди. Кўп ядроли процессорларни қўллаш натижасида операцияларни бажариш жараёнларини параллеллаштириш мумкин, бунинг натижасида сигналларга рақамли ишлов беришга кетадиган вақтни қисқартиришга ва умумий унумдорликни ошириш имконини берган.

4. Кубик бикубик базисли сплайнлар асосида анъанавий кўпхадлар асосидаги махсус процессорлардан тезроқ ва аниқлиги юқори бўлган махсус процессор архитектураси, ҳамда кубик базисли сплайнлар асосида кўпядроли махсус процессор архитектураси ишлаб чиқилди. Кўпядроли архитектура ҳисоблашларни параллел оқимларга ажратиш йўли билан умумий самарадорликни ошириш имконини берди.

5. Автомобиль қисмларини синашнинг сплайн усули яратилди ва ушбу усулни амалга оширувчи дастурий таъминот ишлаб чиқилди. Яратилган усул сигналларни таҳлил қилиш, рақамли ишлаш ва тиклаш масалаларини ечиш, функцияларни аппроксимациялаш мавжуд ҳисоблаш структураларини такомиллаштириш ва янги самарадор структураларни яратиш ва уларни техник характеристикаларини яхшилаш, маълумотларни рақамли ишлаш ва тиклаш натижаларини сифат жиҳатдан яхшилаш имконини берди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.Т.07.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

МИРЗАЕВ АВАЗ ЭГАМБЕРИЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СПЛАЙН ФУНКЦИЙ**

05.01.04-Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,
комплексов и компьютерных сетей

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2019.1PhD/T970.

Диссертация выполнена в Ташкентском университете информационных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.tuit.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Зайнидинов Хакимжон Насридинович**
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Мухамедиева Дилноз Тулкуновна**
доктор технических наук, профессор

Қаххоров Аълохон Аброрович
кандидат технических наук, доцент

Ведущая организация: **Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 г. в __ часов на заседании научного совета DSc.27.06.2017.T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий. (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер №__). (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2019 года.
(протокол рассылки №__ от «__» _____ 2019 г.).

Р.Х.Хамдамов
Председатель научного совета
по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор.

Ф.М.Нуралиев
Ученый секретарь научного совета по
присуждению ученых степеней, д.т.н., доцент

М.С.Якубов
Председатель научного семинара при научном
совете по присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире развитие современных информационно-коммуникационных технологий и внедрение их в различные отрасли производства являются важными, имеют важное значение для создания параллельных алгоритмов при решении задач восстановления и цифровой обработки сигналов, осуществления процессов обработки на основе многоядерной архитектуры поиска оптимальных решений. Современные этапы развития структуры машин, комплексов и систем, установленных на объектах, которые входят в структуру устройств, специализированных для ведения научных исследований или расположенные на подвижных составах характеризуются оперативным анализом сложных процессов и полей и повышенными требованиями к скорости обработки больших объемов данных в режиме реального времени, в частности, в США, Российской Федерации, Индии и Республике Корея, особое внимание уделяется разработке методов решения проблем обработки изображений и сигналов путем использования современных методов, алгоритмов и структурных средств, архитектуры вычислительных и программных средств.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на создание параллельных алгоритмов и осуществлению процессов обработки на основе многоядерной архитектуры в решении задач по цифровой обработке сигналов. В частности, в этом плане при восстановлении и анализе сигналов широко применяются методы параллельной обработки и методы сплайн-функций, сплайны как класс кусочных функций широко используются в создании программных и аппаратных средств благодаря малому объему вычислений, гибкости алгоритмов обработки, оптимальным дифференциальным и экстремальным свойствам, простоте вычислений параметров, слабое влияние на цельность ошибок, актуальными остаются оперативная обработка данных, повышение эффективности алгоритмов цифровой обработки сигналов, разработки методов, алгоритмов, аппаратных и программных средств, предназначенных для определения локальных особенностей сигналов.

В Республике внедряются информационно-коммуникационные технологии для развития автомобильной промышленности, реализуются меры по применению параллельных алгоритмов при построении вычислительных систем для повышения эффективности производства. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 гг., в частности определены задачи по «развитию и модернизации дорожно-транспортной, инженерно-коммуникационной и социальной инфраструктур, ... внедрения информационно-коммуникационных технологий»¹. При осуществлении данных задач, одним из важных вопросов является разработка параллельных алгоритмов для многоядерных процессоров,

¹Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 г. № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан»

моделей структур специальных процессоров на основе кубических и бикубических сплайнов.

Данное исследование в определенной мере служит осуществлению задач, определенных Указами Президента Республики Узбекистан за №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» и от 12 декабря 2017 года № УП-5278 «О мерах по коренному реформированию Национальной системы оказания государственных услуг населению», Постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан от 15 сентября 2017 года №728 «О мерах по совершенствованию порядка оказания электронных государственных услуг через Единый портал интерактивных государственных услуг Республики Узбекистан», а также других нормативно-правовых актов, касающихся данной сферы.

Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологии IV. «Информатизация и развитие инфокоммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. До настоящего момента получены научные и практические результаты по разработке методов и алгоритмов по работе с изображениями, цифровой обработке геофизических и сейсмических сигналов. В частности, вопросы математического моделирования рассматривались в работах Г.И.Марчука, Ю.Н.Субботина, В.А.Василенко, решению теории сплайнов, посвящены работы С.Завьялова, С.Ф.Свиньина, С.Б.Стечкина, В.Л.Мирошниченко, М.Исроилова, Х.Шодиметова, вопросы разработки моделей и проектов архитектур специальных процессоров рассматривались в трудах А.И.Гребенникова, Б.И.Красова, О.Зенкевича, Дж.Фикса, К.деБора, Г.Стренга, а также в научных работах М.М.Камилова, Т.Ф.Бекмурадова, М.Мусаева, А.Имамова, Х.Н.Зайнидинова и других ученых.

Недостаточно изучены проблемы методов создания таблично-алгоритмических структур специальных процессов, совместного применения основ теории сплайнов, создания высокоэффективных и точных методов, разработки программных и аппаратных средств параллельного вычисления для восстановления и цифровой обработки сигналов.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов плана научно-исследовательских работ Ташкентского университета информационных технологий по теме: №ЁФ4-001- «Теоретико-методические основы создания аппаратно-программных систем обработки сигналов на основе сплайнов» (2014), №Ф4-021-«Теоретические методологические основы создания интеллектуально-программных технических систем восстановления и обработки звука в кусочно-

полиномиальных базисах» (2012-2016) и №БА-А5-021-«Создание специализированной системы обработки сейсмических сигналов и вейвлет-анализа» (2016-2018).

Целью исследования является разработка методов и программного обеспечения повышения эффективности алгоритмов цифровой обработки функциональных зависимостей с использованием кубических и бикубических сплайнов.

Задачи исследования:

исследование методов и способов приближения функциональных зависимостей, полученных в результате эксперимента и функций, а также определение оптимального метода для выбранного класса сигналов;

создание параллельных алгоритмов цифровой обработки сигналов для многоядерных процессоров;

разработка моделей структур специализированных процессоров на основе кубических и бикубических сплайнов;

разработка структуры программного обеспечения для моделирования процессов цифровой обработки одно и двумерных функциональных зависимостей с использованием сплайнов.

Объектом исследования являются стенды проверки и структуры специализированных процессоров, используемых при обработке сигналов.

Предмет исследования – методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов на основе кубических и бикубических сплайнов.

Методы исследования. Теоретическими основами проведенных исследований являются теория функционального анализа, теория сплайн-функций и моделирования, теория рядов и матриц, а также теория параллельных вычислений.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

в результате исследования методов приближения функций и функциональных зависимостей, полученных в ходе экспериментов, для выбранного класса сигналов усовершенствован метод сплайн-функций на основе аналитического анализа;

разработаны параллельные алгоритмы цифровой обработки сигналов, полученных в результате испытаний автомобильных частей;

разработаны эффективные алгоритмы для цифровой обработки вибросигналов в многоядерных процессорах на основе кубических и бикубических базисных сплайнов;

разработана структура программного обеспечения для моделирования процессов цифровой обработки одномерных и двумерных функциональных зависимостей с использованием сплайнов;

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

создана алгоритм и программа моделирования структур вычисления на основе базисных сплайнов;

разработаны алгоритм и программа для моделирования двумерных сигналов с помощью бикубических базисных сплайнов;

разработаны алгоритм и программа для кусочно-базисной обработки сигналов.

Достоверность результатов исследований обосновывается тем, что в результате исследования и анализа проблемы высокие требования к производительности вычислительных систем, используемых в области цифровой обработки сигналов согласуются с требованиями по созданию новых методов и алгоритмов, основанных на сплайн-функциях, или параллельно-конвейерных многопроцессорных и многоядерных систем.

Научная и практическая значимость результатов исследования обосновывается теоретическими и методическими основами разработки программного обеспечения при цифровой обработке сигналов и формализации данных, техническими системами цифровой обработки, а также методикой принятия решений в трудно формализуемых информационных системах.

Практическая ценность выполненных исследований заключается в повышении качества процесса испытания автомобильных частей разработанным и усовершенствованным программным комплексом на основе алгоритмов цифровой обработки вибросигналов

Внедрение результатов исследования. На основе результатов, полученных в ходе разработки программного обеспечения и алгоритмов повышения эффективности процессов цифровой обработки функциональных зависимостей с помощью кубических и бикубических базисных сплайнов:

алгоритм цифровой обработки и сглаживания данных, цифровой обработки сигналов на основе сплайн-методов внедрен в акционерную компанию «GM-Uzbekistan» (справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан от 6 декабря 2018 г. №33-8/9165). В результате разработанный алгоритм и система позволил сократить время для вычислений на 12%, время документирования результатов на 26% и погрешности сократились на 7-15%, позволил повысить эффективность производства на 40-45%;

разработанный алгоритм, предназначенный для анализа и цифровой обработки сейсмических сигналов сплайн-методом, а также для контроля сейсмических колебаний в процессе работы устройств, внедрен в акционерную компанию «GM-Uzbekistan» (справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан от 6 декабря 2018 г. №33-8/9165). В результате позволил сократить время вычислений на 14%, время документирования результатов на 25%;

алгоритм, предназначенный для цифровой обработки вибросигналов, которые получены в процессе испытания автомобильных деталей, методом кубических и бикубических сплайнов внедрен в ООО «UMID UCHKUNI AUTO»(справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан от 6 декабря 2018 г. №33-8/9165). В результате позволил повысить точность обнаружения неисправностей в

автомобильных деталях на 15%, уменьшить время вычисления программного обеспечения 4-5 раз;

алгоритм, предназначенный для цифровой обработки вибросигналов, которые получены в процессе испытания автомобильных деталей, методом кубических и бикубических сплайнов внедрен в ООО «TOP TRANSPORT TASHKENT» (справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан от 6 декабря 2018 г. №33-8/9165). В результате позволил повысить точность обнаружения неисправностей в автомобильных деталях на 18%; точность результатов на 15%; сократить время, затрачиваемое на вычислительные процессы программным обеспечением в 2-4 раза.

Апробация результатов исследования. Результаты настоящего исследования апробированы и обсуждены на 12 международных и 9 Республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме исследования опубликовано всего 29 научных работ, в частности 6 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией к публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в 2 зарубежном журнале и 4 Республиканских журналах, а также получены свидетельства на 5 программных разработок для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 109 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определены цель и задачи, объект и предмет исследования, приводится соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна, практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрывается теоретическая и практическая значимость результатов исследования, приведены внедрение результатов исследования, сведения об опубликованности результатов и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ современных методов приближения функций»** представлен анализ методов применяемых при приближении функций, метод приближения функциональных зависимостей с помощью одномерных сплайнов, методы приближения функциональных зависимостей на основе многомерных сплайнов.

Современные методы цифровой обработки сигналов во многом зависят от алгоритма и структурных средств, развития программных средств и архитектуры вычислительных средств.

Наиболее простой и широко используемой частью задачи восстановления аналитического вида функций на основе табличных данных функций является вопрос об интерполяции данных функций.

В классической интерполяции многочлены строятся в самом интервале $[a, b]$. Чем больше мы увеличиваем узловые точки, тем лучше приближение. Однако степень создаваемого многочлена зависит от количества узловых точек, увеличение числа узлов ведет к увеличению коэффициента многочлена, что затрудняет задачу решения системы алгебраических уравнений высокого порядка. Возможности классических интерполяционных многочленов частично ограничены. Поскольку число системы составленных алгебраических уравнений зависят от количества узловых точек, повышается и порядок систем алгебраических уравнений. В результате при построении классических полиномов возникает ряд недостатков:

поскольку интерполяционный многочлен имеет высокую степень, то формула получается неудобной;

в процессе решения системы алгебраических уравнений высших степеней возникают определенные методические ошибки;

усложняется процесс вычисления, в результате появляется ошибка вычисления.

Создаваемый многочлен может плохо приближаться к восстанавливаемому многочлену. Поэтому в целях избавления от этих недостатков, использование в задачах интерполяции для приближения с помощью сплайн-функций вместо классических полиномов имеет большие возможности и уже нашло отражение в науке.

Локальные интерполяционные сплайны хорошо приближаются к интерполируемому объекту и имеют простой вид. Степень сплайна, который строится, не зависит от узловых точек. Создаваемая сплайн-функция строится не на интервале $[a, b]$, а в интервале $[x_i, x_{i+1}]$ $i = \overline{0, n-1}$ и данная сплайн-функция на каждом интервале будет состоять из многочленов одинаковой структуры.

В классической интерполяции на всем интервале $[a, b]$ строилась одна функция. Поэтому интерполяция с помощью сплайн-функций по сравнению с классической интерполяцией имеет высокую степень точности и более простую конструкцию. Кусочно-гладкие многочленные функции, построенные на интервалах $[x_i, x_{i+1}]$ ($i = \overline{0, n-1}$) называются *сплайн-функциями*.

Интерполяция функций показывает, что интерполяция сплайн-функциями более эффективна, чем интерполяция посредством классических полиномов.

Собственно полиномиальная интерполяционная сплайн-функция:

- 1) обеспечивает хорошее приближение к объекту;
- 2) имеет простую конструкцию и отличается простотой при составлении компьютерного алгоритма.

На практике мы широко используем функции третьей степени, то есть кубические сплайны. В формуле описания сплайна значение коэффициента сплайна выражается посредством узлов функции и расстояния между узлами (1). Для сплайнов с $d = 2$ дефектом алгоритмы считаются абсолютно устойчивыми. Однако при $d = 1$ сглаживающие рекуррентные сплайны отнюдь не устойчивы. Кубические В-сплайны выражаются следующим образом.

$$B_3(x) = \begin{cases} 0, & x \geq 2, \\ (2-x)^3/6, & 1 \leq x < 2, \\ 1/6(1+3(1-x)+3(1-x)^2-3(1-x)^3), & 0 \leq x < 1, \\ B_3(-x), & x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 1 приведен один базисный сплайн. На рис. 2 же приведен комплекс кубических базисных сплайнов, сдвинутых на неизменяемый шаг $h=1$.

Для сплайнов 3 степени локальные формулы имеют следующий вид:

- 3-точечная формула:

$$b_i = (1/6)(-f_{i-1} + 8f_i - f_{i+1});$$

- 5-точечная формула:

$$b_i = (1/36)(f_{i-2} - 10f_{i-1} + 54f_i - 10f_{i+1} + f_{i+2});$$

- 7-точечная формула

$$b_i = (1/216)(-f_{i-3} + 12f_{i-2} - 75f_{i-1} + 344f_i - 75f_{i+1} + 12f_{i+2} - f_{i+3})$$

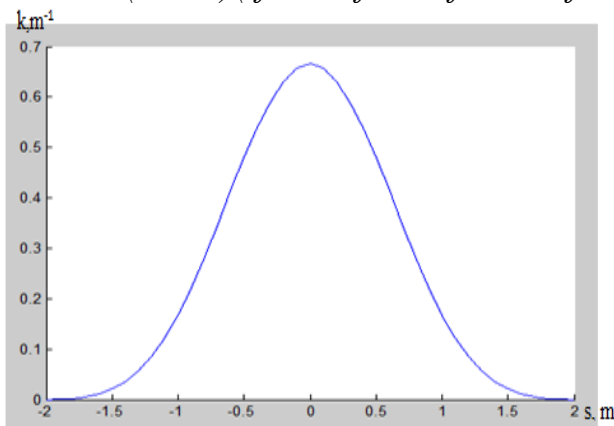


Рис. 1. Кубический базисный сплайн

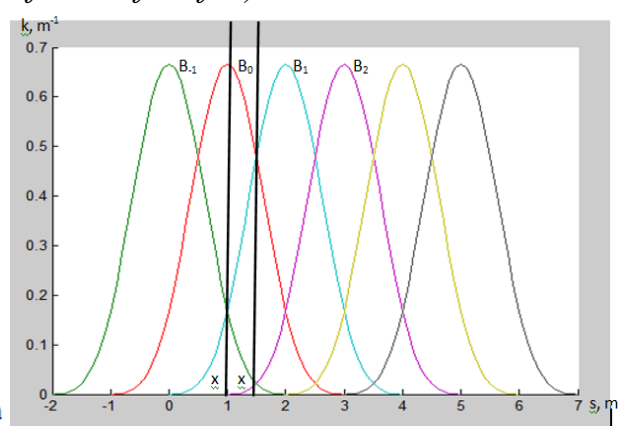


Рис. 2. Комплекс кубических базисных сплайнов

$S_m(x)$ сплайн степени m с дефектом 1, который интерполирует функцию $f(x)$ можно представить только с помощью суммы В-сплайнов:

$$f(x) \cong S_m(x) = \sum_{i=-1}^{m+1} b_i \cdot B_i(x), \quad a \leq x \leq b, \quad (2)$$

где b_i – коэффициенты.

Таким образом, исследование методов приближения функций и сведений, полученных в ходе эксперимента (в виде таблиц) с помощью кубических сплайнов, показало следующее:

1. Использование кубических базисных сплайнов для решения ряда задач, особенно при приближении функций, имеющих резонансные высокоградиентные точки, дает лучшие результаты по точности относительно других многочленов.

2. При приближении функций и сведений, полученных в ходе эксперимента (в виде таблиц), с помощью формулы (2) проявляется локальное свойство B-сплайнов. Это указывает на то, что значение этой функции в произвольной точке можно представить только в виде $m+1$ (здесь m - степень сплайна), т.е. коэффициенты можно определить путем линейной формы в виде суммы произведений базисных элементов. Приведенный выше многочлен (2) является основой для распараллеливания вычислений и создания параллельных архитектур специализированных процессоров.

В последнее время получила развитие теория многомерных сплайнов функций приближения со многими переменными. Если иметь в виду только область интерполяционных полиномиальных сплайнов, то определение одномерных сплайнов расширится до состояния многих аргументов. При этом функция $S_m(x,y)$ будет двумерным сплайном степени m относительно сетки $\{x_i, y_i\}$. Если он совпадет с полиномом степени m , то по x и y для каждого прямого угла D будет справедливо подобное.

По каждому аргументу многомерные полиномиальные B-сплайны равной степени m будут определяться как тензорное произведение одномерных B-сплайнов:

$$B_m(x, y, \dots, u) = B_m(x) \otimes B_m(y) \otimes \dots \otimes B_m(u)$$

В частности, для двумерного сплайна $S_m(x,y)$ степени m будет применима формула:

$$S_m(x, y) = \sum \sum b_{ij} B_{m,i}(x) B_{m,j}(y),$$

В данной сумме вторичных кратких произведений коэффициенты и одномерные B-сплайны будут знаменателем, выражение $[x_i, x_{i+1}; y_j, y_{j+1}]$ для определения ненулевых значений двумерного базисного сплайна

$$B(x, y) = B(x) \otimes B(y)$$

будет представлять собой прямоугольник, который получается посредством размельчения сетки:

$$\Delta x: x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n;$$

$$\Delta y: y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_{n-1} < y_n.$$

Таким образом, локальные свойства одномерных сплайнов полностью распространены для многомерных сплайнов. На одном и том же шаге аппроксимации двумерный сплайн можно выразить посредством двух одномерных сплайнов.

Таблица

Сравнение функций приближения многочленами

Параметры сравнения	Многочлен Лагранжа	Многочлен Ньютона	Сплайн
Ошибка вычисления $f(x) = \begin{cases} x^2, & x < 2 \\ \ln(x), & x \geq 2 \end{cases}$	$1,08 \cdot 10^{-8}$	$1,88 \cdot 10^{-8}$	$0,20 \cdot 10^{-8}$
Методические ошибки	$\varepsilon \leq (3/128) \max f^4(x) h^4$	$\varepsilon \leq (3/128) \max f^4(x) h^4$	$\varepsilon \leq (4/384) \max f^4(x) h^4$
Количество вычислений (для архитектуры с ядром N=1024 4)	7372	9420	4096
Интерполяция	Решается система уравнений	Решается система уравнений	Решается система уравнений, но матрица уравнений не полная, 3-5-диагональная. Существует эффективный метод их решения – метод прогонки.
Аппроксимация	С ростом количества узловых точек возрастает и степень многочлена, в результате чего повышается значение ошибки.	С ростом количества узловых точек возрастает и степень многочлена, в результате чего повышается значение ошибки.	Можно использовать “точечные” формулы. Степень многочлена не возрастает с увеличением числа узловых точек.

В результате анализа существующих методов приближения функций была рассмотрена задача интерполяции, при этом если в начале под интерполяцией понимался процесс поиска значений функций для значений аргумента, не представленных в таблице, то теперь понятие интерполяции понимается шире. Кроме того, в данном разделе были рассмотрены вопросы приближения интерполяционным многочленом Лагранжа, интерполяционным многочленом Ньютона, сплайн-функциями, были выявлены преимущества сплайн-функций по сравнению с другими многочленами (см. таблицу).

Во второй главе диссертации «**Архитектура специализированных процессоров для цифровой обработки сигналов**» рассматриваются основные понятия цифровой обработки сигналов, традиционная и многоядерная архитектура цифровых сигнальных процессоров, параллельные алгоритмы, предназначенные для многоканальной архитектуры цифровой обработки сигналов. В настоящее время актуальными остаются вопросы анализа многих существующих методов, алгоритмов и архитектур, применяемых в цифровой обработке сигналов, а также изучения их преимуществ.

Цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) (англ. DSP - Digital Signal Processor) появились намного позже универсальных микропроцессов (МП).

Их возникновение связано со спецификой алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС). В алгоритмах ЦОС наиболее распространенной операцией является вычисление суммы произведений, которая получила название базовой операции ЦОС.

Впервые ЦСП появились на мировом рынке в начале 80 гг. В последующие годы такие фирмы как Texas Instruments (TI), Freescale (Motorola), Analog Devices (ADI) непрерывно развивали производство ЦСП для различных отраслей. На сегодня технологии производства ЦСП динамично развиваются.

Для достижения необходимой скорости в ЦСП осуществлены следующие архитектурные решения:

- Гарвардская архитектура. В данной архитектуре память разделена на две области: программная память (ПП) и память данных (ПД). При этом из памяти считываются и команда и информация.

- Модифицированная Гарвардская архитектура. В данной архитектуре имеется возможность непосредственного обмена данными между ПП и ПД. Это позволяет сформировать команды в виде эффективного конвейера.

- Распараллеливание команд по одновременно работающим функциональным модулям.

- Внедрение ЦОС, выполняемого за один цикл, и ориентирование базовых операций на устройство.

Фирма Analog Device в 2005 году запустила производство двухядерных ЦСП марки ADSP BF 561.

Развитие микропроцессорной техники позволило перейти от многоядерной и многопроцессорной архитектуры к многоядерной, в которой каждое ядро выполняет функции самостоятельно работающих процессоров. Это не упрощает процесс производства программ подготовки и записи алгоритмов, но дает возможность не увеличить объем нерешенных задач, а расширить область паралельных вычислений.

Рассмотрим алгоритм параллелизации, процесс восстановления данных, полученных в ходе эксперимента и с помощью кубических базисных сплайнов, разделения на потоки посредством OpenMP. Если формулу (2), приведенную в первой главе диссертационной работы, применим к кубической базисной функции, то получим следующую функцию:

$$f(x) \cong S_3(x) = b_{-1}B_{-1}(x) + b_0B_0(x) + b_1B_1(x) + b_2B_2(x)$$

В результате анализа традиционной и многоядерной архитектуры цифровых сигнальных процессоров разработаны параллельные алгоритмы, предназначенные для многоядерной архитектуры цифровой обработки сигналов. В последние годы произошли фундаментальные сдвиги в развитии микропроцессоров. Данные сдвиги характеризуются переходом от одноядерной архитектуры к многоядерной архитектуре. В частности, широкое распространение получили архитектуры специальных процессоров, Гарвардская, фон Неймана, а также компаний Блекфин и ADSP.

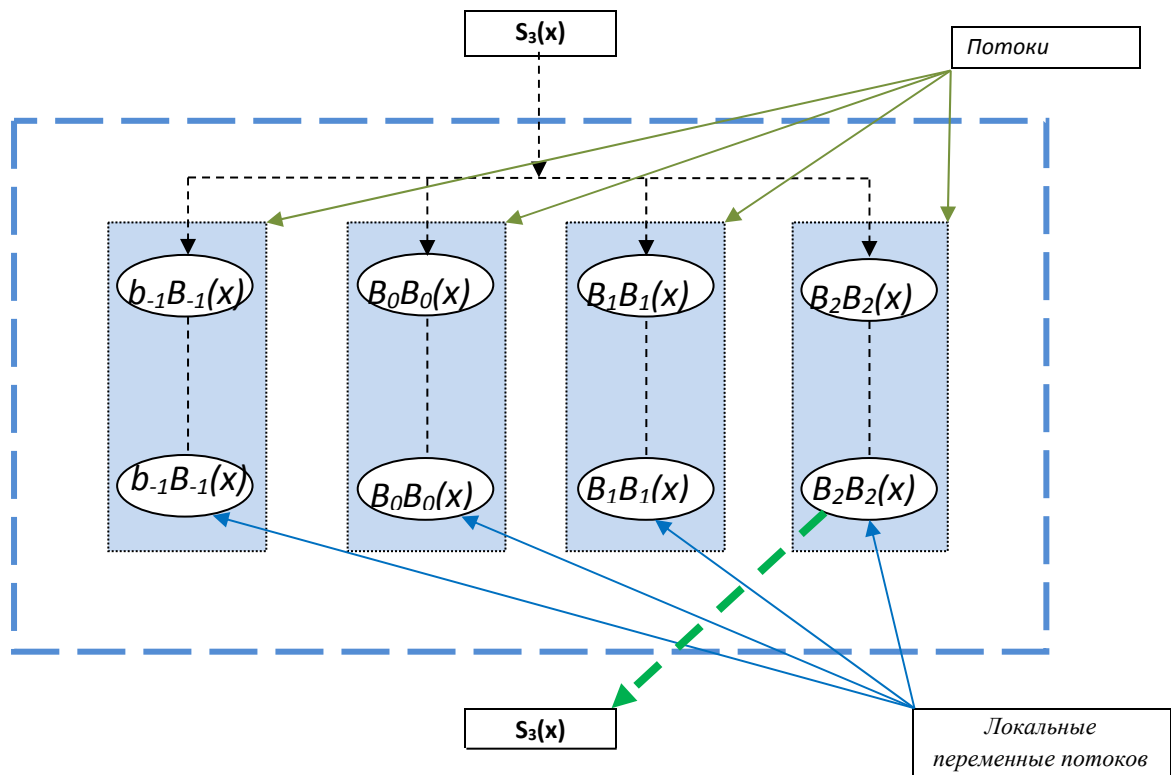


Рис. 3. Алгоритм формирования потоков в четырехядерной архитектуре

Если каждое из четырех операций умножений разделить на параллельные потоки, то параллельный алгоритм можно представить следующим образом. Данный алгоритм можно осуществить с помощью четырехядерной архитектуры. При передаче потоков в первую очередь выполняются последовательно, затем параллельно, потом опять последовательно. Это позволяет значительно сократить время вычислений (рис. 3).

Процесс перехода к многоядерной архитектуре стал возможным в результате за счет понижения некоторых технологических норм, только повышения тактической частоты одноядерной архитектуры, которая себя физически исчерпала. В результате применения многоядерных процессоров возможна параллелизация процессов выполнения операций, что позволяет сократить время цифровой сигналов и повысить общую производительность.

В третьей главе диссертации «**Параллельные алгоритмы цифровой обработки сигналов на основе кубических и бикубических сплайнов**» описывается архитектура традиционных и многоядерных специальных процессоров на основе кубических сплайнов, многоядерные архитектуры на основе бикубических сплайнов, используемых в восстановлении двумерных функциональных связей.

Задача построения сплайнов на основе экспериментальных данных, представленных в аналитическом и табличном виде, сводится к вычислению коэффициентов b_i . В общих случаях следует определить сетку Δ -сплайна.

Локальные формулы сохраняют свойства сглаженности приближения. Значения же параметров не зависят от индекса i и учета точек, значительно удаленных от текущей точки. Они бывают симметричными. Однако применимы только для двух внутренних точек области.

При обнаружении ошибок в экспериментальных результатах, построение интерполяционного сплайна теряет смысл. В таких случаях в целях уменьшения ошибок возникает необходимость в применении сглаживающих сплайнов.

К сглаживающему сплайну относится сплайн, который является «более гладким», чем интерполирующий сплайн, и проходит вблизи точки экспериментальных значений.

Минимизируем функционал:

$$J(f) = \int_a^b |S''(x)|^2 dx + \sum_{i=0}^N 1/R_i (f - S_i)^2, \quad (3)$$

где $R_i > 0$ – заданная величина. Чем меньше коэффициент R_i , тем более ближе проходит сплайн-функция относительно заданного значения f_i .

Для минимизации функционала (3) следует решить матричное линейное уравнение с пятью диагоналями. На основе построенного сплайна излишние множители заново вычисляются и строится новый сплайн на основе нового R_i . Процесс итерации должен продолжаться до соответствия значения сплайна заданному «коридору». Недостатком данного метода является исключение сжатия результатов эксперимента.

При использовании метода наименьших квадратов для приближения узел функций размещается больше, чем узел сплайнов.

Вместе с тем, следует минимизировать следующий функционал:

$$I(f) = \sum_{i=1}^N (f_i - S_i)^2,$$

где S_i – сплайн-функция, f_i – заданная функциональная зависимость.

Таким образом, анализ методов вычисления коэффициентов приближения на основе сплайнов показал, что проблема построения сплайн-функций на основе экспериментальных результатов сводится к проблеме вычисления коэффициентов b . Для систем, работающих в режиме реального времени, предлагаются формулы «точечного» вычисления коэффициентов. Выражение функций в виде базисных сплайнов является удобным для осуществления в аппаратах, структура вычисления которых предполагает применение таблично-алгоритмического метода.

Таким образом, основным преимуществом структуры является высокоскоростное действие для таблично-алгоритмических методов. Поскольку сумма вычислений В-сплайнов равна сумме в одномерной области $m + 1$.

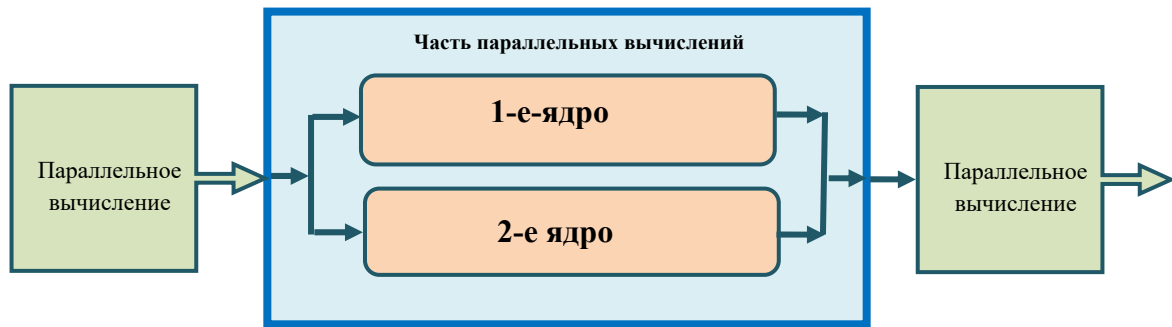


Рис. 4. Структура двухядерного параллельного вычисления в кубических базисных сплайн-функциях

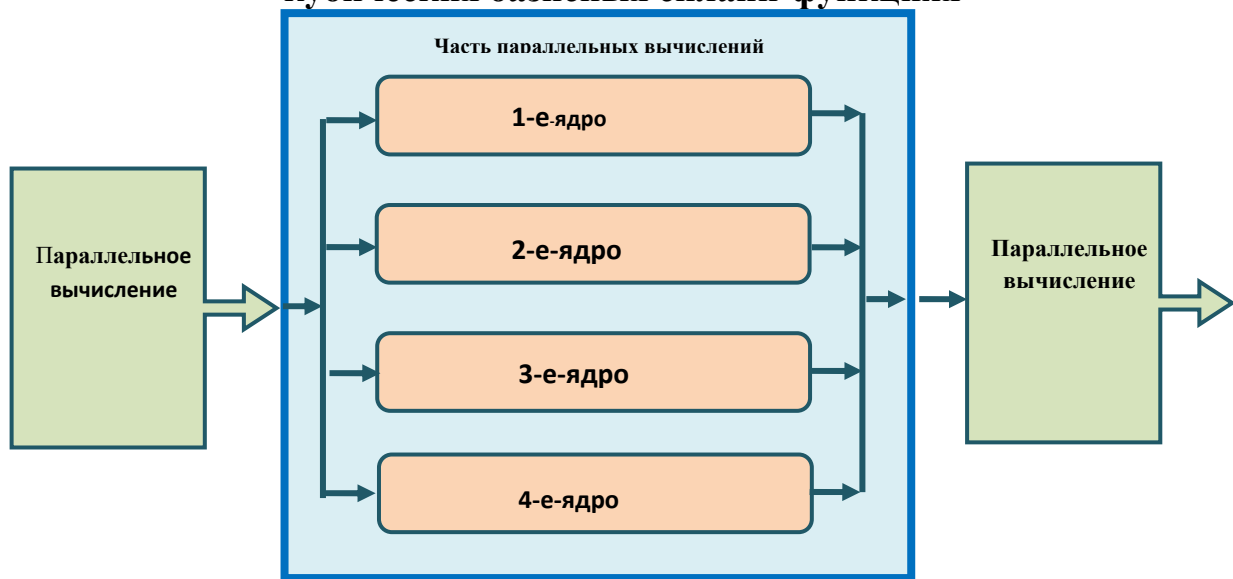


Рис. 5. Структура четырехядерного параллельного вычисления в кубических базисных сплайн-функциях

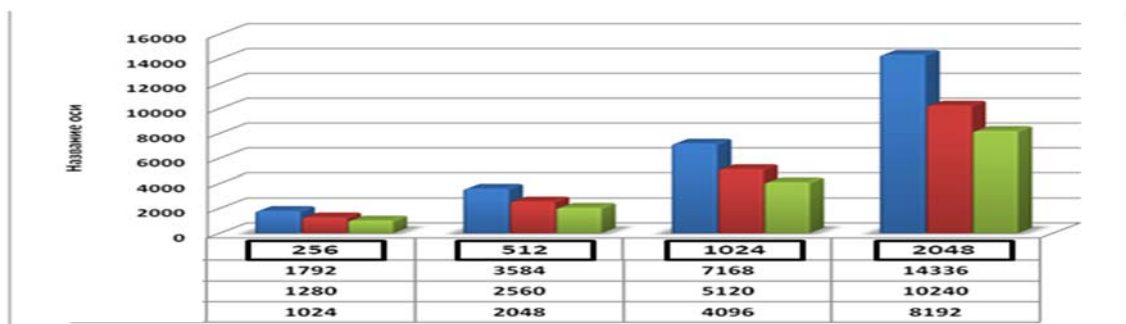


Рис. 6. Сравнительный график вычислений в вычислительных структурах 1-,2-,4 ядерных параллельных вычислений в кубических базисных сплайн-функциях.

Количество процессоров ограничено, необходимость построения состава экономного вычисления можно видеть на примере бикубических сплайнов. Вводится система одномерных сплайн-функций:

$$C_i(y) = \sum_{j=-1}^{n_2+1} b_{ij} B_j(y), \text{ где } i = -1, 0, 1, \dots, n+1, \quad (4)$$

Затем вычисляется двумерный сплайн:

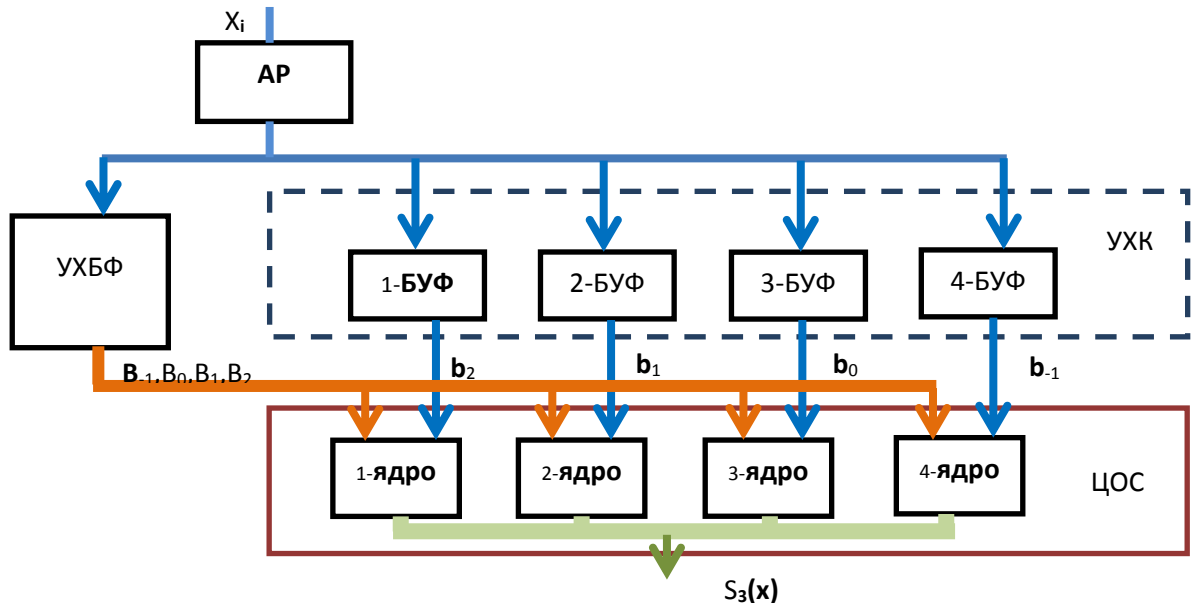


Рис. 7. Структура 4-ядерного вычисления для осуществления аппроксимации в кубических базисных сплайн-функциях

$$S_3(x, y) = \sum_{i=-1}^{n_1+1} C_i(y) B_i(y), \quad (5)$$

Каждое из изменений типа (4) и (5) можно осуществить параллельно при наличии $m + 1$ процессора-множителя.

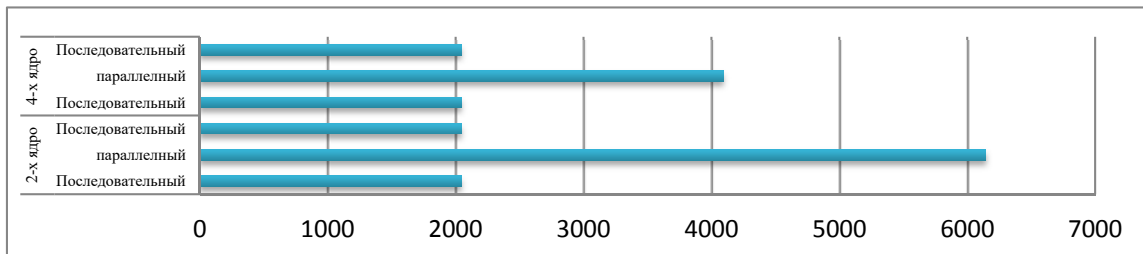


Рис. 8. Сравнительный график 2- и 4-ядерными процессорами Сплайн-метод сглаживания траектории автомобиля.

В процессе испытания автомобиля с помощью специального измерительного устройства произведено измерение множества точек S , характеризующих состояние автомобиля, который движется по определенной дороге. Количество точек во множестве составляет $n = 260$, расстояние между точками одинаковое и равно $\Delta n = 0,5$ м, длина пройденного пути 129,5 м. Максимальная кривизна траектории движущегося автомобиля не превысила $0,11 \text{ м}^{-1}$ (рис. 9).

Приведен график, отражающий $T(S)$ в качестве функции протяженности дороги, полужирная линия определяет кривизну траектории $T(\tilde{S})$. Траектория $T(\tilde{S})$ построения на базе множестве новых точек \tilde{S} и очень

близка к траектории $T(S)$ и вместе с тем имеет гладко меняющуюся кривизну, а также максимальное значение производной кривой, которая меньше в 35 раз. Максимальное значение погрешности аппроксимации графика $T(\tilde{S})$ составляет $\delta_{\max} \approx 4,4$ мм. (рис 10)

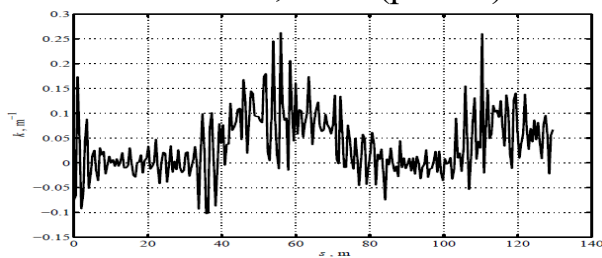


Рис. 9. Кривизна траектории $T(S)$ как функция длины пути

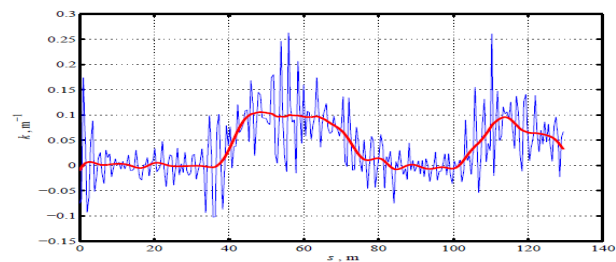


Рис 10. Кривизна траектории тонкой линии и траектории

В четвертой главе диссертации «Программное обеспечение моделирования специальных процессоров и методов на основе базисных сплайнов» приводятся модель таблично-алгоритмических специальных процессоров на основе кубических сплайнов.

Одним из удобных решений для переноса «одноядерного» программного обеспечения на многоядерную платформу или производства новых «параллельных» программных продуктов является программный пакет Open Multi-Processing (OpenMP). OpenMP - это компилятор, который создан на широко распространенном стандартном языке программирования языке C, и является программным продуктом, осуществляющим параллельные вычисления для переменных окружающей среды..



Рис. 11. Структура программного обеспечения

Многоядерные процессоры уже много лет представлены на рынке, однако существует очень мало программ, которые в полной мере используют возможности многоядерных процессоров. Технология OpenMP позволяет разрабатывать параллельные программы, которые будут полностью эксплуатировать мощности многоядерных программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований по теме диссертационной работы **«Повышение эффективности цифровой обработки сигналов на основе сплайн-функций»** получены следующие результаты и основные выводы:

1. В результате исследования сплайн-методов создан метод приближения большего числа используемых на практике элементарных функций с помощью базисных сплайнов. Данный метод позволяет выразить функциональные зависимости математического аппарата базисных сплайнов в виде суммы значений произведений постоянных коэффициентов и базисных функций.

2. В результате сочетания возможностей теории базисных сплайнов и таблично-алгоритмических методов созданы параллельные архитектуры специализированных процессоров, обладающих высокой эффективностью. Это позволяет в значительной мере распараллеливать вычисления.

3. Процесс перехода к многоядерной архитектуре появился в результате физического исчерпания возможностей и повышения производительности за счет снижения тактовой частоты и некоторых технологических норм одноядерных процессоров. Применение многоядерных процессоров позволило распараллелить выполнение операций, в результате чего появляется возможность сократить время цифровой обработки сигналов и повысить общую производительность.

4. Разработаны архитектура многоядерного процессора на основе кубических базисных сплайнов и архитектура успешного процессора на основе кубических и бикубических сплайнов, которые быстрее и точнее процессоров на базе традиционных многочленов. Многоядерная архитектура позволяет повысить общую эффективность за счет разделения вычислений на параллельные потоки.

5. Создан сплайн-метод испытания автомобильных деталей и разработано программное обеспечение, реализующее данный метод. Созданный метод позволяет проводить анализ сигналов, решать вопросы восстановления и цифровой обработки, совершенствовать существующие вычислительные структуры, создания новых эффективных структур, улучшения их технических характеристик и качественному улучшению результатов восстановления.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.27.06.2017.T.07.01AT TASHKENT UNIVERSITY OF
INFORMATION TECHNOLOGIES**

TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES

MIRZAEV AVAZ EGAMBERDIEVICH

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF DIGITAL PROCESSING
ALGORITHMS BASED ON SPLINE FUNCTIONS**

05.01.04 – Mathematical and software support of computers,
complexes and computer networks

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent-2019

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2019.1PhD/T970

The dissertation has been prepared at the Tashkent University of Information Technologies.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English(resume)) on the website www.tuit.uz and on the website of «ZiyoNet» Information and educational portal www.ziynet.uz.

Scientific adviser: **Zaynidinov Khakimjon Nasiritdinovich**
doctor of technical sciences, professor

Official opponents: **Mukhmedieva Dilnoz Tulkunovna**
doctor of technical sciences, professor

Qaxxorov Alokxon Abrorovich
candidate of technical sciences, docent

Leading organization: **Tashkent Railway Engineering**

The defense will take place “ ____ ” _____ 2019 at ____ the meeting of Scientific council No. DSc.27.06.2017.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under No. ____). (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52).

Abstract of dissertation sent out on “ ____ ” _____ 2019 y.
(mailing report No. ____ on “ ____ ” _____ 2019 y.).

R.Kh.Khamdamov
Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

F.M. Nuraliev
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, docent

M.C. Yakubov
Chairman of the academic seminar under the
scientific council awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work is the development of methods and software to increase algorithms' efficiency of digital processing of functional dependencies using a cubic and bicubic splines.

The object of the research work is the stands of control and special designs of the processor used when processing signals as objects of researches.

The scientific novelty of the research work consists in the follows:

it was offered to use optimum a method a spline functions for the chosen class of signals as a result of studying of functions and methods of transformation of functional communications from an experiment;

the parallel algorithms of digital signals processing are developed for experimental signals;

the parallel algorithms of digital signal processing on the basis of cubic and bicubic splines are developed;

the parallel algorithms for visualization of digital execution and modeling of digital signal processing using one and twodimensional functional communications with splines are developed;

Implementation of research results. On the basis of the results of development of algorithms and the software were developed efficiency algorithms to increase of digital signal processing of functional connections using of cubic and bicubic splines:

an algorithms of digital data processing and burnish process were implemented in practice to control of seismic vibration at operation of the equipment in Joint-stock company GM-Uzbekistan (certificate of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan from December 6, 2018 №33-8/9165). As a result of introduction of the automated system of data processing and digital data processing the following results were achieved: time spent for calculations was reduced by 12%, time of documenting of results was reduced by 26%, the production efficiency increased by 40-45%, losses decreased by 7-15%; accuracy of the received results increased;

an algorithms of seismic signals processing and digital processing using spline methods, an algorithms to control seismic vibration signals were implemented in Joint-stock company GM-Uzbekistan (certificate of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan from December 6, 2018 №33-8/9165). At the result calculations time spent was reduced by 14%, time of documenting of results was reduced by 25%;

an algorithms to digital process of vibro signals from the automobile spare parts testing process using cubic and bicubic basis splines were implemented in LLC UMID UCHKUNI AVTO (certificate of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan from December 6, 2018 №33-8/9165). At the result detection of malfunctions in automobile details increased by 15%, and computation process of the software was reduced by 4-5 times;

an efficient algorithm to process vibro signals using cubic and bicubic basis splines in the multiprocessors were implemented in LLC TOP TRANSPORT TASHKENT (certificate of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan from December 6, 2018 №33-8/9165). Implementation of results of a research led to increase in accuracy of detection of malfunctions in automobile details for 18%; accuracy of results was reduced by 15%; accuracy of the received results increased; Time spent for program calculations was reduced by 2-4 times.

Structure and volume of the dissertation. Dissertation consists of four chapters, the list of the used literature and application. The volume of the thesis is 109 pages.

ЭЪЛОНҚИЛИНГ АНИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

1. Мирзаев А.Э., Мирворисов Ж.Б. Функцияларни яқинлаштириш масаласи моделлари // “ТАТУ хабарлари”. №3, 2011, Тошкент.–Б.58-60, (05.00.00; №31)

2. Мирзаев А.Э., Ахмаджонов Ш.А. Функционал боғланишларни моделлаштириш масалаларида кўп ўлчовли полиномиал сплайнлар // “ТАТУ хабарлари”. №3, 2011, Тошкент.–Б. 58-60, (05.00.00; №31)

3. Мирзаев А.Э. Автомобиль траекториясини моделлаштиришнинг сплайн усули // “ТАТУ хабарлари”. №4, 2011, Тошкент.–Б. 64-66, (05.00.00; №31)

4. Mirzaev A.E., Khalilov S.P. Signallarni qayta tiklashdagi interpolyatsiya masalasi va interpolyatsion kubik splaynning ahamiyati // “TATU xabarlarlari”. №1, 2015, Тошкент.–Б.20-24,(05.00.00; №31)

5. Zaynidinov H.N., Mirzayev A.E., Khalilov S.P. The Use of The Spectral Properties of Basis Splines in Problems of Signal Processing // Journal of multimedia Information System. Vol. 5, №1, 2018. –P. 63-66. (№35), Crossref,IF=0,106.

6. Zaynidinov Hakimjon, Kim Sung Soo, Avaz Mirzaev. Piecewise-Polynomial Bases For Digital Signal Processing // International Journal of Ubiquitous Computing and Internationalization. Vol.3,№1, 2011 Korea. -P 59-65.

7. Зайнидинов Х.Н., Мирзаев А.Э., Халилов С.П. Применение спектральных свойств базисных сплайнов в задачах обработки сигналов. // Автоматика и программная инженерия. 2017. №4 (22).-С. 80-85.

8. Mirzaev A.E., Khalilov S.P. Simulation Of Methods Of Functional Dependencies On The Basis Of One-Dimensional Splines // Хисоблаш ва амалий математика муаммолари илмий журнали, 2016. №1. –Б. 89-90.

9. Hakimjon Zaynidinov, Avaz Mirzaev, Hsein-Ping Kew, Do-Un Jeong. Piecewise-polynomial Bases and Specialized Processor for Digital Signal Processing // IEEE Symposium on Industrial Electronics and Application (ICIEA 2009), Kuala Lumpur, Malaysia.–P. 599-603.

10. Мирзаев А.Э., Халилов С.П. Использование цифро-аналоговой линеаризации во время аппроксимация непрерывными сплайнами //Министерство образования и науки Российской Федерации Воронежский государственный университет XVI Международная научно-методическая Конференция VII Международная школа-конференция «Информатика в образовании».Воронеж-2016 г. –С. 401-406.

11. Mirzaev A.E. Simulation of functioning of computing structure on the basis of cubic basic splines // “International conference IT Promotion in ASIA 2008”.-P. 189-193.

12. Мирзаев А.Э. Многопроцессорная параллельно-конвейерная вычислительная структура на основе бикубических сплайнов // Шестая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов государств участников РСС «Техника и технология связи». Ташкент-2008.–С. 223-225.

13. Мирзаев А. Э., Халилов С.П., Абдумаликов А.А. Анализ и обработка многомерных геофизических сигналов с использованием сплайн-метода // “Сборник статей VII международной научной конференции “Приоритетные направления в области науки и технологии в XXI веке”, 2-том, Ташкент-2014. –С. 245-247.

14. Джайлаов А.А., Мирзаев А.Э., Турдиматов М.М. Цифро-аналоговая линеаризация на основе аппроксимации непрерывными сплайнами. “Амалий математика ва информацион технологияларнинг долзарб муаммолари Ал-Хоразмий 2014”. Халқаро илмий конференция мақолалари, тўплам № 1, Самарқанд-2014. –Б. 15-17.

15. Mirzaev A.E., Xalilov S.P. Analysis and modeling specialized processor for digital signal processing on the piecewise-polynomial bases. // “Perspectives for the development of information technologies ITPA 2014” Transactions of the international scientific conference, Tashkent-2014. –P. 189-193.

16. Mirzaev A.E., Xalilov S.P. Digital analoguelinearization by approximating continual Splines. Transactions of the international scientific conference // “Perspectives for the development of information technologies ITPA 2015” ,. Tashkent-2015. –P. 178-180.

17. Mirzaev A.E., Xalilov S.P. Simulation methods of functional dependencies Based on cubic splines // Transactions of the international scientific conference “Perspectives for the development of information technologies ITPA 2015”. Tashkent-2015. –P. 180-183.

18. Зайнидинов Х.Н., Мирзаев А.Э., Халилов С.П. Сигналларга рақамли ишлов берувчи махсус процессорлар тахлили // Илмий тадқиқот ва кадрлар тайёрлаш тизимида инновацион ҳамкорликни ривожлантириш муаммолари ва истиқболлари мавзусида халқаро илмий-амалий анжумани материаллари. Бухоро-2017й. –Б. 106-107.

19. Мирзаев А. Э., Халилов С.П., Бобожонов М. Использование вейвлета батла-лемарье и в-сплайнов для биологической обратной связи интерфейсов нейрокомпьютеров // Илмий тадқиқот ва кадрлар тайёрлаш тизимида инновацион ҳамкорликни ривожлантириш муаммолари ва истиқболлари мавзусида халқаро илмий-амалий анжумани материаллари. Бухоро-2017й. –Б. 107-109.

20. Мирзаев А. Э., Халилов С.П., Бобожонов М. Вычислительная структура на основе кубических базисных сплайнов для параллельных вычислений // Илмий тадқиқот ва кадрлар тайёрлаш тизимида инновацион ҳамкорликни ривожлантириш муаммолари ва истиқболлари мавзусида халқаро илмий-амалий анжумани материаллари. Бухоро-2017й. –Б. 203-205.

21. Мирзаев А.Э., Маликова Н.Т. Многомерные полиномиальные сплайны в задачах моделирования функциональных зависимостей. // Тошкент Давлат Иқтисодиёт Университети “Иқтисодий ахборотларни қайта ишлаш ва химоя қилишни таъминловчи технологияларни яратиш муаммолари ва ечимлари” Республика илмий Амалий анжумани. Тошкент-2009. –Б. 164-165.

22. Мирзаев А.Э., Маликова Н.Т. Способы вычисления коэффициентов моделирования многомерными сплайнами // Тошкент Давлат Иқтисодиёт Университети “Иқтисодий ахборотларни қайта ишлаш ва химоя қилишни таъминловчи технологияларни яратиш муаммолари ва ечимлари” Республика илмий Амалий анжумани. Тошкент-2009. –Б. 190-191.

23. Мирзаев А. Э., Халилов С.П. Сигналларни таҳлил қилиш ва қайта тиклаш масалаларини ечиш учун сплайн функцияларни қўллаш // “Ахборот технологиялари ва телекоммуникация тизимларини самарали ривожлантириш истиқболлари” Республика илмий-техник конференцияси маърузалар тўплами, 1 қисм. Тошкент-2014й. –Б. 216-219.

24. Мирзаев А. Э., Халилов С.П. Аппроксимация непрерывными сплайнами для цифро-аналоговой линеаризации // “XXI аср-интеллектуал авлод асри” шиори остидаги Тошкент вилояти ва Тошкент шаҳар худудий илмий-оммавий конференцияси материаллари, Аниқ ва техника фанлари, IV-қисм, Тошкент-2014.–Б. 106-109.

25. Мирзаев А. Э., Халилов С.П. Interpolyatsion kubik splaynlarning signallarni qayta tiklashda ahamiyati // “XXI аср-интеллектуал авлод асри” шиори остидаги Тошкент вилояти ва Тошкент шаҳар худудий илмий-оммавий конференцияси материаллари, Аниқ ва техника фанлари, IV-қисм, Тошкент-2014. –Б. 206-211.

26. Мирзаев А.Э., Турсунов И.И., Кўп ўлчовли полиномиал сплайнлар функционал боғлиқликни моделлаштириш масалалари // “Хорижий Шарқ мамлакатларида иқтисодиётни модернизациялаш ва тадбиркорлик салоҳиятини оширишнинг долзарб масалалари” Республика илмий-амалий конференцияси материаллари. Тошкент-2014 йил.–Б. 360-364.

27. Мирзаев А. Э., Халилов С.П. Способы вычисления коэффициентов моделирования функциональных зависимостей базисными сплайнами // Сборник научных статей Республиканской научно-практической конференции «Перспективные направления применения инновационных технологий в национальной экономике», Ташкент-2014. –Б. 182-185.

28. Мирзаев А.Э., Моделирование таблично-алгоритмической вычислительной структуры для вычисления функций двух переменных на основе бикубических сплайнов // “Замонавий ахборот коммуникация технологиялари” ТАТУ Самарқанд филиали профессор-ўқитувчиларининг X илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами, Самарқанд-2015.–Б. 170-173.

29. Мирзаев А.Э., С.П.Халилов. Двумерные вейвлет-базисы с компактными носителями в задаче выборки сигналов-функций двух

переменных // “Иқтисодиётнинг реал тармоқларини инновацион ривожлантиришда ахборот-коммуникация технологиларининг аҳамияти” Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами, 1-қисм, Тошкент-2017 й. –Б. 226-229.

30. Зайнидинов Х.Н., Косимова У.З., Мирзаев А.Э. Базисли сплайнлар асосидаги ҳисоблаш структураларини моделлаштириш дастури // Ўзбекистон Республикаси Давлат патент идораси Гувоҳнома № DGU 01606, 16.10.2008.

31. Зайнидинов Х.Н., Косимова У.З., Мирзаев А.Э. Икки ўлчовли сигналларни бикубик базисли сплайнлар билан моделлаштириш учун дастур // Ўзбекистон Республикаси Давлат патент идораси Гувоҳнома № DGU 01607, 16.10.2008.

32. Зайнидинов Х.Н., Дхананжай Сингх., Мирзаев А.Э., Маликова Н.Т. Сигналларга бўлак-базис усулда ишлов бериш учун дастур // Ўзбекистон Республикаси Давлат патент идораси Гувоҳнома № DGU 01717, 19.03.2009.

33. Дхананжай Сингх., Зайнидинов Х.Н., Хун Жае Ли., Мирзаев А.Э. Сигналларга Уолшнинг вейвлет усулида ишлов бериш учун дастур // Ўзбекистон Республикаси Давлат патент идораси Гувоҳнома № DGU 01746, 06.05.2009.

34. Дхананжай Сингх Зайнидинов Х.Н., Ума ШанкарТивари., Хун Жае Ли., Мирзаев А.Э. Сигналларга бўлак-базис усулда ишлов бериш учун дастур // Ўзбекистон Республикаси Давлат патент идораси Гувоҳнома № DGU 01747, 06.05.2009.

Автореферат «ТАТУ хабарлари» илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус тилларидаги матнларнинг мослиги текширилди.

Бичими: 84x60 1/16. «Times New Roman» гарнитура рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи: 3. Адади 100. Буюртма №30.

«Тошкент кимё-технология институти» босмахонасида чоп этилди.
100011, Тошкент, Навоий кўчаси, 32-уй.