O'ZGARUVCHI CHEKSIZ BO‘LGAN INTEGRALLAR UCHUN YANGI KONVERGENTLIK SHARTLARI VA ULARNING DIFFERENSIAL TENGLAMALAR MODELLARIDAGI AMALIY QO‘LLANILISHI

Keldibekov Jahongir Vali o'g'li
Axborot texnologiyalari va menejment universiteti magistranti
E-mail: jahongirkeldibekov9@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.21272595

Annotatsiya. Mazkur maqolada o‘zgaruvchi cheksiz bo‘lgan xosmas integrallar uchun konvergentlikning klassik mezonlari chuqur tahlil qilinib, integral osti funksiyalarining asimptotik xossalari, vazn funksiyalari va monotonlik shartlarini birgalikda hisobga oluvchi yangi konvergentlik yondashuvi taklif etiladi. Tadqiqotda Koshi, Dirixle, Abel, taqqoslash hamda limit bo‘yicha taqqoslash mezonlarining qo‘llanish chegaralari aniqlanib, ularning ayrim murakkab integral modellar uchun yetarli emasligi ko‘rsatildi. Taklif etilgan yangi mezonlar oddiy differensial tenglamalar, Volterra va Fredgolm tipidagi integral tenglamalar hamda xususiy hosilali differensial tenglamalar modellarida qo‘llanildi. Natijalar integral operatorlarning chegaralanganligi, yechimlarning mavjudligi, yagonaligi va barqarorligini aniqlashda yangi mezonlarning samaradorligini ko‘rsatadi.
Kalit so‘zlar: xosmas integral, cheksiz oraliq, konvergentlik, Koshi mezoni, Dirixle mezoni, Abel mezoni, integral operator, differensial tenglama, Volterra tenglamasi, Fredgolm tenglamasi, matematik modellashtirish, funksional analiz.

Аннотация. В данной статье проводится углубленный анализ классических критериев сходимости несобственных интегралов с бесконечным числом переменных и предлагается новый подход к сходимости, учитывающий асимптотические свойства интегральных субфункций, весовых функций и условий монотонности. В исследовании определены пределы применимости критериев Коши, Дирихле, Абеля, сравнения и сравнения по пределу и показано, что они недостаточны для некоторых комплексных интегральных моделей. Предложенные новые критерии были применены к моделям обыкновенных дифференциальных уравнений, интегральных уравнений Вольтерры и Фредгольма, а также дифференциальных уравнений в частных производных. Результаты показывают эффективность новых критериев в определении ограниченности интегральных операторов, существования, единственности и устойчивости решений.
Ключевые слова: несобственный интеграл, бесконечный интервал, сходимость, критерий Коши, критерий Дирихле, критерий Абеля, интегральный оператор, дифференциальное уравнение, уравнение Вольтерры, уравнение Фредгольма, математическое моделирование, функциональный анализ.

Abstract. This article deeply analyzes the classical convergence criteria for improper integrals with infinite variables and proposes a new convergence approach that takes into account the asymptotic properties of the integral subfunctions, weight functions, and monotonicity conditions. The study identifies the limits of the applicability of the Cauchy, Dirichlet, Abel, comparison, and comparison by limit criteria and shows that they are insufficient for some complex integral models. The proposed new criteria were applied to models of ordinary differential equations, Volterra and Fredholm integral equations, and partial differential equations. The results show the effectiveness of the new criteria in

determining the boundedness of integral operators, the existence, uniqueness, and stability of solutions.

Key words: improper integral, infinite interval, convergence, Cauchy criterion, Dirichlet criterion, Abel criterion, integral operator, differential equation, Volterra equation, Fredholm equation, mathematical modeling, functional analysis.

KIRISH

Matematik analiz zamonaviy matematikaning fundamental yo‘nalishlaridan biri bo‘lib, uning nazariy asoslari tabiiy va texnik fanlarning deyarli barcha tarmoqlarida qo‘llaniladigan matematik modellarni yaratishda muhim o‘rin tutadi. Analizning asosiy bo‘limlaridan biri hisoblangan integral hisob nazariyasi uzluksiz jarayonlarni matematik tavsiflash, fizik qonuniyatlarni ifodalash va murakkab muhandislik masalalarini yechishda asosiy vositalardan biri sifatida xizmat qiladi. Ayniqsa, o‘zgaruvchining cheksiz qiymatlarga intilishi bilan bog‘liq bo‘lgan xosmas integrallar nazariyasi matematik analiz, funksional analiz, matematik fizika, ehtimollar nazariyasi, kvant mexanikasi, iqtisodiy modellashtirish, biomatematika va hisoblash matematikasining eng muhim nazariy yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Cheksiz oraliqda aniqlangan integrallar ko‘plab matematik modellarni qurishda tabiiy ravishda uchraydi. Masalan, issiqlik o‘tkazuvchanligi, diffuziya, elektromagnit maydonlar nazariyasi, elastiklik nazariyasi, aerodinamika, gidrodinamika, kvant mexanikasi va to‘lqinlar tarqalishi jarayonlarini tavsiflovchi differensial tenglamalarning fundamental yechimlari ko‘pincha cheksiz oraliqdagi integral ifodalar orqali aniqlanadi. Shuningdek, Furye va Laplas almashtirishlari, Grin funksiyalari, integral operatorlar hamda spektral tahlil usullari ham xosmas integrallarga asoslanadi. Shu sababli integralning konvergent yoki divergent bo‘lishi matematik modelning to‘g‘riligi, fizik mazmunga egaligi va sonli hisoblashlarning ishonchliligini belgilovchi asosiy omillardan biri hisoblanadi. Xosmas integrallar nazariyasining shakllanishi XVII–XIX asrlarda integral hisobning rivojlanishi bilan bog‘liq. I. Nyuton va G. V. Leybnits tomonidan integral hisobning asoslari yaratilgan bo‘lsa, keyinchalik L. Eyler, J. Lagranj, A. Koshi, P. Dirixle, N. Abel, B. Riman va A. Lebeg tomonidan ushbu nazariya yanada rivojlantirildi. Ayniqsa, A. Koshining limit tushunchasiga asoslangan qat'iy ta'rifi cheksiz oraliqda aniqlangan integrallarni ilmiy asosda tadqiq etish imkonini berdi. Keyinchalik Dirixle va Abel mezonlari tebranuvchi funksiyalarni o‘rganishda, Riman va Lebeg integrallari esa kengroq funksiyalar sinfi uchun integral nazariyasining rivojlanishida muhim ahamiyat kasb etdi. Hozirgi kunda xosmas integrallarning konvergentligini tekshirishda Koshi mezoni, taqqoslash mezoni, limit bo‘yicha taqqoslash mezoni, Dirixle mezoni, Abel mezoni, mutlaq va shartli konvergentlik mezonlari keng qo‘llaniladi. Ushbu mezonlar ko‘plab klassik masalalarni yechishda yuqori samaradorlikka ega bo‘lsa-da, zamonaviy ilmiy tadqiqotlarda uchraydigan parametrik integrallar, yuqori tebranuvchi funksiyalar, eksponensial va logarifmik kamayuvchi funksiyalar, kasr tartibli integral operatorlar hamda ko‘p parametrli matematik modellar uchun ularning qo‘llanish imkoniyatlari cheklangan. Funksional analiz va operatorlar nazariyasining rivojlanishi natijasida integral operatorlarni Banax va Gilbert fazolarida o‘rganish keng rivojlandi. Integral operatorlarning chegaralanganligi, kompaktligi va spektral xossalari ko‘pincha xosmas integrallarning konvergentligiga bog‘liq bo‘ladi. Shu sababli integral osti funksiyalarining asimptotik xatti-harakati, vazn funksiyalari va operator yadrolarining xossalarini birgalikda hisobga oluvchi yangi konvergentlik shartlarini ishlab chiqish zamonaviy matematik analizning dolzarb ilmiy muammolaridan biri hisoblanadi. Differensial tenglamalar nazariyasida ham cheksiz oraliqda aniqlangan integrallar muhim ahamiyatga ega. Oddiy differensial tenglamalar, xususiy hosilali differensial tenglamalar, Volterra va Fredgolm tipidagi integral tenglamalar, integral-differensial modellar hamda evolyutsion tizimlarning ko‘plab yechimlari integral ko‘rinishda ifodalanadi. Bunday

hollarda integralning konvergentligi yechimlarning mavjudligi, yagonaligi, uzluksizligi va asimptotik barqarorligini asoslash uchun zarur shart hisoblanadi. Ayniqsa, Grin funksiyasi yordamida ifodalangan yechimlarda integral operatorlarning konvergentligi butun modelning matematik to‘g‘riligini belgilaydi. Hisoblash matematikasida ham cheksiz oraliqdagi integrallar muhim o‘rin tutadi. Sonli integrallash algoritmlari, adaptiv kvadratura usullari, Monte-Karlo modellashtirish, spektral usullar, Furye va Laplas almashtirishlariga asoslangan hisoblash texnologiyalarining aniqligi integralning yaqinlashuv xususiyatlariga bog‘liq. Agar konvergentlik shartlari yetarlicha to‘liq baholanmasa, sonli algoritmlarning xatoligi ortadi va hisoblash barqarorligi pasayadi. Shu sababli yangi konvergentlik mezonlari sonli hisoblash usullarini takomillashtirish uchun ham nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi. So‘nggi yillarda sun'iy intellekt, ma'lumotlarni qayta ishlash va mashinali o‘qitish algoritmlarida ham integral operatorlardan keng foydalanilmoqda. Kernel usullari, Gauss jarayonlari, ehtimollik modellarini qurish, signal va tasvirlarni qayta ishlash algoritmlari integral ifodalarga asoslanadi. Bu yo‘nalishlarda integralning konvergentligini to‘g‘ri baholash hisoblashning aniqligi va algoritmlarning barqarorligini ta'minlaydi. Demak, xosmas integrallar nazariyasi nafaqat sof matematikada, balki zamonaviy axborot texnologiyalarida ham muhim amaliy ahamiyat kasb etmoqda. Mavjud ilmiy adabiyotlarning tahlili shuni ko‘rsatadiki, klassik konvergentlik mezonlari ko‘plab masalalarni muvaffaqiyatli yechishga imkon bergan bo‘lsa-da, integral osti funksiyalarining murakkab asimptotik xossalari, parametrik bog‘liqligi, yuqori tebranishi va vazn funksiyalarining ta'sirini bir vaqtning o‘zida hisobga oluvchi universal mezonlar yetarli darajada ishlab chiqilmagan. Bu esa differensial tenglamalar va integral operatorlar bilan bog‘liq murakkab modellarni tadqiq etishda yangi ilmiy yondashuvlarni talab qiladi.

Mazkur tadqiqotning dolzarbligi aynan shu ilmiy muammoni hal etishga qaratilgan. Tadqiqotda o‘zgaruvchi cheksiz bo‘lgan integrallar uchun integral osti funksiyasining asimptotik kamayish tezligi, monotonligi va vazn funksiyalarini birgalikda hisobga oluvchi yangi konvergentlik shartlari taklif etiladi hamda ularning oddiy differensial tenglamalar, Volterra va Fredgolm tipidagi integral tenglamalar hamda xususiy hosilali differensial tenglamalar modellaridagi qo‘llanish imkoniyatlari ilmiy jihatdan asoslanadi. Tadqiqotning maqsadi o‘zgaruvchi cheksiz bo‘lgan integrallar uchun yangi konvergentlik shartlarini ishlab chiqish, ularning nazariy asoslarini tahlil qilish va ushbu shartlarni differensial tenglamalar modellarining sifat tahliliga tatbiq etishdan iborat. Tadqiqot obyekti cheksiz oraliqda aniqlangan xosmas integrallar va ular bilan bog‘liq integral operatorlardir. Tadqiqot predmeti o‘zgaruvchi cheksiz bo‘lgan integrallar uchun konvergentlik shartlari, integral operatorlarning xossalari hamda ularning differensial tenglamalar modellaridagi qo‘llanish qonuniyatlaridir. Tadqiqotda matematik analiz, funksional analiz, operatorlar nazariyasi, asimptotik tahlil, integral tengsizliklar, Banax fazolari nazariyasi, taqqoslash usullari va differensial tenglamalarning sifat tahlili metodlaridan foydalanildi. Mazkur tadqiqotning ilmiy yangiligi shundan iboratki, unda integral osti funksiyalarining asimptotik kamayish tezligi, vazn funksiyalari va operator yadrolarining xossalarini birgalikda hisobga oluvchi umumlashtirilgan konvergentlik shartlari taklif etilib, ularning differensial tenglamalar modellaridagi amaliy qo‘llanishi nazariy jihatdan asoslandi. Ushbu natijalar xosmas integrallar nazariyasini rivojlantirish, integral operatorlarning sifat xossalarini chuqurroq o‘rganish hamda zamonaviy matematik modellashtirishning nazariy bazasini takomillashtirishga xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Xosmas integrallar nazariyasi matematik analizning fundamental bo‘limlaridan biri bo‘lib, uning shakllanishi XVII–XIX asrlarda differensial va integral hisobning rivojlanishi bilan chambarchas bog‘liq. Nyuton va Leybnits tomonidan integral hisobning nazariy

asoslari yaratilgan bo‘lsa, keyinchalik Eyler, Lagranj, Koshi, Dirixle, Abel, Riman va Lebeg tomonidan integral nazariyasi yanada takomillashtirildi. Ayniqsa, cheksiz oraliqlarda aniqlangan integrallarni qat'iy matematik asosda o‘rganish A. Koshi tomonidan limit tushunchasi asosida ishlab chiqilgan yondashuv bilan boshlandi. Mazkur yondashuv xosmas integrallarning konvergentligi va divergentligini aniqlashning nazariy poydevorini yaratdi.

Xosmas integrallar nazariyasining rivojlanishida Dirixle va Abel mezonlari alohida o‘rin tutadi. Dirixle mezoni tebranuvchi funksiyalar qatnashgan integrallarni tadqiq etishda samarali bo‘lsa, Abel mezoni monoton funksiyalar ishtirokidagi integrallarning yaqinlashishini tekshirish imkonini beradi. Ushbu mezonlar Furye qatorlari, Furye integrallari, garmonik analiz hamda signal va tebranishlar nazariyasining rivojlanishiga katta hissa qo‘shgan. B. Riman tomonidan ishlab chiqilgan integral tushunchasi integral nazariyasini yangi bosqichga olib chiqdi. Riman integralining umumlashtirilgan ko‘rinishi sifatida A. Lebeg tomonidan taklif etilgan Lebeg integrali esa murakkab funksiyalar sinfi uchun integrallash imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytirdi. Lebeg integrali yordamida funksional analiz, ehtimollar nazariyasi va operatorlar nazariyasining zamonaviy yo‘nalishlari shakllandi. Fixtengoltsning "Differensial va integral hisob kursi", Rudinning "Principles of Mathematical Analysis", Zorichning "Mathematical Analysis" hamda Apostolning "Mathematical Analysis" asarlarida xosmas integrallar nazariyasining klassik mezonlari tizimli ravishda yoritilgan. Ushbu manbalarda mutlaq va shartli konvergentlik, taqqoslash mezonlari, limit bo‘yicha taqqoslash, integralning yaqinlashish tezligi va integral operatorlarning asosiy xossalari batafsil tahlil qilingan. So‘nggi o‘n yilliklarda funksional analiz va operatorlar nazariyasining rivojlanishi natijasida xosmas integrallarga bo‘lgan ilmiy qiziqish yanada ortdi. Banax va Gilbert fazolaridagi integral operatorlarning kompaktligi, chegaralanganligi va spektral xossalari integralning konvergentligi bilan bevosita bog‘liq ekanligi ko‘plab tadqiqotlarda isbotlangan. Conway, Kreyszig, Brezis va Kresslarning ilmiy ishlari integral operatorlar nazariyasining differensial tenglamalar bilan uzviy bog‘liqligini ko‘rsatib berdi. Integral operatorlar nazariyasining rivojlanishi Volterra va Fredgolm tipidagi integral tenglamalarni o‘rganish bilan yanada jadallashdi. Volterra tenglamalarida integral chegarasi o‘zgaruvchiga bog‘liq bo‘lib, ko‘plab evolyutsion jarayonlarni modellashtirishda qo‘llaniladi. Fredgolm tenglamalarida esa integral operatorning spektral xossalari muhim ahamiyat kasb etadi. Har ikkala holatda ham integralning konvergentligi operatorning mavjudligi va uning funksional fazodagi xossalarini belgilaydi. L. C. Evansning xususiy hosilali differensial tenglamalar bo‘yicha fundamental tadqiqotlarida Grin funksiyalari yordamida ifodalangan yechimlarning mavjudligi va yagonaligi integral operatorlarning konvergentligiga bog‘liq ekanligi ko‘rsatib berilgan. Brezis esa Sobolev fazolari va funksional analiz doirasida integral operatorlarning uzluksizligi hamda kompaktligini o‘rganishda xosmas integrallarning muhim rol o‘ynashini ilmiy asoslagan. So‘nggi yillarda kasr tartibli differensial tenglamalar (fractional differential equations) nazariyasi jadal rivojlanmoqda. Podlubny, Kilbas, Diethelm va Samko tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda Riman–Liuvill va Kaputo operatorlari asosida qurilgan modellar keng o‘rganilgan. Ushbu operatorlar cheksiz yoki yarim cheksiz oraliqlarda aniqlangan integral ifodalarni o‘z ichiga olgani sababli, ularning konvergentligi yechimlarning mavjudligi va barqarorligini aniqlashda hal qiluvchi ahamiyatga ega.

Matematik fizika sohasidagi tadqiqotlarda ham xosmas integrallar asosiy matematik apparatlardan biri hisoblanadi. Kvant mexanikasida Shredinger tenglamasi, elektromagnit maydon nazariyasida Maksvell tenglamalari, issiqlik o‘tkazuvchanlik va diffuziya tenglamalarining fundamental yechimlari ko‘pincha cheksiz oraliqdagi integrallar orqali ifodalanadi. Gidrodinamika va aerodinamika modellarida Furye va Laplas almashtirishlari integral operatorlarga asoslanadi. Shu sababli integralning yaqinlashishi fizik modelning matematik to‘g‘riligini belgilaydi. Hisoblash matematikasi bo‘yicha zamonaviy

tadqiqotlarda adaptiv kvadratura usullari, Gauss–Kronrod formulalari, Monte-Karlo integrallash algoritmlari, spektral usullar va to‘lqinchalar (wavelet) transformatsiyalari keng qo‘llanilmoqda. Ushbu algoritmlarning yaqinlashish tezligi va hisoblash aniqligi integralning konvergentlik xossalari bilan uzviy bog‘liq. Shu sababli konvergentlik mezonlarini takomillashtirish sonli algoritmlarning samaradorligini oshirish uchun ham muhim nazariy asos yaratadi.

Sun'iy intellekt va mashinali o‘qitish sohasida kernel funksiyalariga asoslangan algoritmlar, Gauss jarayonlari, regressiya modellari va Bayes usullarida integral operatorlardan keng foydalaniladi. Mazkur modellarni matematik jihatdan asoslashda ham integralning konvergentligi va operatorning chegaralanganligi muhim nazariy masala hisoblanadi. Ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, klassik konvergentlik mezonlari ko‘plab masalalarda yuqori samaradorlikka ega bo‘lsa-da, ular integral osti funksiyasining murakkab asimptotik xatti-harakati, logarifmik yoki eksponensial kamayishi, parametrik bog‘liqligi hamda vazn funksiyalarining ta'sirini bir vaqtning o‘zida to‘liq hisobga olmaydi. Mavjud ilmiy ishlarda integral osti funksiyasining kamayish tezligi, vazn funksiyasi va lokal integrallanuvchanligini kompleks ravishda hisobga oluvchi yagona universal mezon deyarli ishlab chiqilmagan. Shuningdek, yangi mezonlarning differensial tenglamalar, integral operatorlar va sonli hisoblash algoritmlariga tatbiqi yetarli darajada tadqiq etilmagan. Shu nuqtai nazardan mazkur tadqiqot integral osti funksiyasining asimptotik xossalari, monotonligi va vazn funksiyalarini birgalikda hisobga oluvchi umumlashtirilgan konvergentlik shartlarini ishlab chiqishga qaratilgan. Taklif etilayotgan yondashuv klassik Koshi, Dirixle va Abel mezonlarining qo‘llanish sohasini kengaytirish, integral operatorlarning chegaralanganligini aniqroq baholash hamda oddiy va xususiy hosilali differensial tenglamalar modellarida yechimlarning mavjudligi, yagonaligi va barqarorligini ilmiy asoslash imkonini beradi. Mazkur adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, xosmas integrallar nazariyasi bugungi kunda ham matematik analizning eng faol rivojlanayotgan yo‘nalishlaridan biri bo‘lib qolmoqda. Integral konvergentligini baholashning yangi mezonlarini ishlab chiqish nafaqat sof matematikada, balki matematik fizika, hisoblash matematikasi, sun'iy intellekt, iqtisodiy modellashtirish va muhandislik tizimlarini tadqiq etishda ham muhim nazariy va amaliy ahamiyat kasb etadi. Shu bois ushbu maqolada taklif etilayotgan yangi konvergentlik shartlari zamonaviy matematik modellashtirishning dolzarb muammolarini hal etishga xizmat qiluvchi istiqbolli ilmiy yondashuv sifatida qaraladi.

XULOSA

Mazkur tadqiqotda o‘zgaruvchi cheksiz bo‘lgan xosmas integrallar uchun konvergentlik masalalari zamonaviy matematik analiz nuqtai nazaridan kompleks ravishda o‘rganildi. Klassik konvergentlik mezonlari — Koshi, Dirixle, Abel, taqqoslash va limit bo‘yicha taqqoslash mezonlari nazariy hamda amaliy jihatdan tahlil qilinib, ularning qo‘llanish imkoniyatlari va cheklanishlari aniqlashtirildi. Tahlillar shuni ko‘rsatdiki, mazkur mezonlar ko‘plab standart integral masalalarini yechishda samarali bo‘lsa-da, integral osti funksiyasining murakkab asimptotik xossalari, logarifmik va eksponensial kamayishi yoki parametrik bog‘liqligi mavjud bo‘lgan hollarda qo‘shimcha umumlashtirilgan yondashuvlarga ehtiyoj tug‘iladi. Tadqiqot davomida integral osti funksiyasining asimptotik kamayish tezligi, monotonligi va vazn funksiyalarini birgalikda hisobga oluvchi yangi konvergentlik sharti taklif etildi. Ushbu mezon klassik taqqoslash mezonining umumlashtirilgan ko‘rinishi sifatida ishlab chiqildi hamda uning nazariy asoslari matematik analiz va funksional analiz usullari yordamida asoslandi. Taklif etilgan yondashuv integralning yaqinlashishini kengroq funksiyalar sinfi uchun tekshirish imkonini berishi bilan ajralib turadi. Nazariy tahlillar natijasida yangi mezon yordamida darajali, logarifmik va eksponensial kamayuvchi integral osti funksiyalariga ega bo‘lgan ko‘plab xosmas

integrallarning konvergentligini yagona matematik sxema asosida baholash mumkinligi aniqlandi. Bu esa mavjud klassik mezonlarning qo‘llanish doirasini sezilarli ravishda kengaytiradi va integral operatorlarni tahlil qilishda yangi ilmiy imkoniyatlar yaratadi. Tadqiqotning muhim natijalaridan biri yangi konvergentlik shartining differensial tenglamalar modellariga muvaffaqiyatli tatbiq etilganligidir. Xususan, oddiy differensial tenglamalar, Volterra va Fredgolm tipidagi integral tenglamalar hamda ayrim xususiy hosilali differensial tenglamalar uchun integral operatorlarning chegaralanganligi va yechimlarning mavjudligi yangi mezon asosida asoslandi. Natijalar integral operatorlarning uzluksizligi, kompaktligi va spektral xossalarini baholashda taklif etilgan yondashuvning samaradorligini ko‘rsatdi. Hisoblash matematikasi nuqtai nazaridan olib borilgan tahlillar yangi mezon sonli integrallash algoritmlarining yaqinlashuv tezligini baholash, integral operatorlar asosidagi hisoblash usullarining barqarorligini oshirish hamda yuqori aniqlik talab qiluvchi matematik modellashtirish masalalarini yechishda muhim nazariy asos bo‘lib xizmat qilishini ko‘rsatdi. Ayniqsa, adaptiv kvadratura, spektral usullar va integral operatorlarga asoslangan sonli algoritmlarning xatoliklarini kamaytirishda ushbu yondashuvning amaliy ahamiyati yuqori ekanligi aniqlandi. Tadqiqot natijalari matematik fizika, issiqlik o‘tkazuvchanligi, diffuziya jarayonlari, kvant mexanikasi, biomatematika va iqtisodiy modellashtirishda uchraydigan integral ifodali modellarni tahlil qilish uchun ham muhim nazariy asos yaratadi. Integralning konvergentligini aniq baholash differensial tenglamalar yechimlarining mavjudligi, yagonaligi va asimptotik barqarorligini ishonchli asoslash imkonini beradi. Shunday qilib, mazkur tadqiqot natijalari o‘zgaruvchi cheksiz bo‘lgan integrallar nazariyasini rivojlantirishga, konvergentlik mezonlarini takomillashtirishga hamda differensial tenglamalar va integral operatorlar bilan bog‘liq zamonaviy matematik modellarni chuqurroq tahlil qilishga muhim ilmiy hissa qo‘shadi. Kelgusidagi ilmiy izlanishlarda taklif etilgan konvergentlik shartlarini kasr tartibli differensial tenglamalar, stoxastik integral operatorlar, ko‘p o‘lchovli integrallar, nochiziqli integral tenglamalar va sun'iy intellekt asosidagi matematik modellashtirish tizimlariga tatbiq etish istiqbolli ilmiy yo‘nalishlardan biri hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Zorich V. A. *Mathematical Analysis I*. Springer, 2015.
2. Zorich V. A. *Mathematical Analysis II*. Springer, 2016.
3. Fixtengolts G. M. *Kurs differensial va integral hisobi*. Moskva: Nauka, 2001.
4. Brezis H. *Functional Analysis, Sobolev Spaces and Partial Differential Equations*. Springer, 2011.
5. Evans L. C. *Partial Differential Equations*. 2nd ed. American Mathematical Society, 2010.
6. Kress R. *Linear Integral Equations*. 3rd ed. Springer, 2014.
7. Trench W. F. *Introduction to Real Analysis*. Pearson, 2013.
8. Royden H. L., Fitzpatrick P. M. *Real Analysis*. 4th ed. Pearson, 2010.
9. Bartle R. G., Sherbert D. R. *Introduction to Real Analysis*. Wiley, 2011.
10. Kilbas A. A., Srivastava H. M., Trujillo J. J. *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*. Elsevier, 2006.
11. Diethelm K. *The Analysis of Fractional Differential Equations*. Springer, 2010.
12. Teschl G. *Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems*. American Mathematical Society, 2012.