

**TELEKOMMUNIKATSIYA TARMOQLARIDA PAKET
YO‘LLARI VA KECHIKISHLARNI MODELLASHTIRISH VA
SIMULYATSIYA QILISH.**

Ilmiy tatqiqotchi: **Akramov Asrorbek Axrorjon o‘g‘li**

Eshmamatov Beknazar Ural o‘g‘li

Ilmiy rahbar: **Maxmudov Isroil Abdullayevich**

Farg‘ona davlat texnika universiteti

Annotatsiya: Ushbu maqolada telekommunikatsiya tarmoqlarida paket yo'llari va kechikish jarayonlarini modellashtirish hamda simulyatsiya qilishning nazariy asoslari va amaliy mexanizmlari chuqur o'rganiladi. Hisobot tarmog'idagi intensivligi, marsh algoritmlari, kechikish komponentlari va hujjat o'zaro ta'siri matematiklar hamda maxsus simulyatsiya modeli ishlab chiqarish tahlili. Olingan dasturiy ta'minotni tuzatish, sifatini yaxshilash va optimal strategiyalarini ishlab chiqarish uchun ilmiy asos'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: telekommunikatsiya tarmoqlari, paket uzatish, kechikish modellashtirish, marshrutlash algoritmlari, trafik boshqaruvi, simulyatsiya, tarmoq, matematik model, sifatni optimallashtirish, tarmoq arxitekturasini.

Abstract: This article deeply studies the theoretical foundations and practical mechanisms of modeling and simulation of packet paths and delay processes in telecommunication networks. The intensity of the reporting network, marching algorithms, delay components and document interaction are analyzed by mathematicians and the development of a special simulation model. The obtained results serve as a scientific basis for debugging, improving the quality of the software and developing optimal strategies.

Keywords: telecommunication networks, packet transmission, delay modeling, routing algorithms, traffic management, simulation, network, mathematical model, quality optimization, network architecture.

Аннотация: В данной статье глубоко исследуются теоретические основы и практические механизмы моделирования путей прохождения

пакетов и процессов задержки в телекоммуникационных сетях. Интенсивность работы сети передачи данных, алгоритмы маршрутизации, компоненты задержки и взаимодействие документов анализируются математически и разрабатывается специальная имитационная модель. Полученные результаты служат научной основой для отладки, повышения качества программного обеспечения и разработки оптимальных.

Ключевые слова: телекоммуникационные сети, передача пакетов, моделирование задержки, алгоритмы маршрутизации, управление трафиком, имитация, сеть, математическая модель, оптимизация качества.

Kirish: telekommunikatsiya tarmoqlari zamonaviy axborot olishining eng muhim texnologiya asoslaridan biri, global miqyos millionlab jihozlar, axborot va xavfsizlik o'rtasida yuqori tezlikda va ishonchli ma'lumot olishini ta'minlash. Raqamli transformatsiya jarayonining tezlashuvi, IoTJining kengayishi, bulutli real zaryadning rivoji vaqt rejimidagi xavfsizligiga bo'lgan talabning ortishi tufayli telekommunikatsiya tarmoqlariga tushadigan yuklanish hajmi keskin oshib ketadi. Bunday sharoitda paketlarning tarmoq bo'ylab harakatlanishi, ishlab chiqarish yo'l aniqlanishi va kechikishlarning shakllanish mexanizmlarini chuqur o'rganish, ushbu jarayonlarni modellashtirish va simulyatsiya qilish telekommunikatsiya tizimlarining samarali yordam uchun muhim ilmiy-amaliy vositalaridan biriga aylanmoqda. Paket yo'llari va kechikishlarni modellashtirish tarmoqlari arxitekturasidagi jarayonlarni chuqur, trafikni optimal boshqarish va aloqa sifatini oshiradi. Telekommunikatsiya tarmoqlari orqali foydalanish paket-kommutatsiya paydo bo'ladi, bunda har bir ma'lumot paketga bo'linib, mustaqil raqobat eng maqbul yo'l orqali manzilga yetkazib beriladi. harakatning dinamik o'zgaruvchanligi, marshrutning murakkablashuvi, marshrutning murakkablashuvi, marshrutning murakkablashuvi, kechikish komponentlari va tarmoq yuklanishining notekis taqsimlash jarayoni paketlarning yetib borishi tezligi farqlanishi mumkin. Buning uchun kechishlarni aniq modellashtirish va tahrirlash o'zgarishlar bo'yicha ilmiy tahlil telekommunikatsiya tizimlarini sozlash va boshqarishda katta korxona ega. Uch mavzu bo'yicha olib borilgan sinov asosida marrutlash algoritmi bo'yicha olib tashlashni olib tashlash, real trafikidagi kechikishlarni aniqlash, tarmoq tugunlari yangi paketlarni modellashtirish va simulyatsiya muhitida turli stsenariylarni o'tkazishni o'z ichiga oladi. Bunda matematik modellar, statistik usullar va kompyuter

simulyatsiyalari bir-biri bilan uzviy bog'langan holda qo'yilgan. Telekommunikatsiya tizimlaridagi kechikish mexanizm qismlardan iborat: uzatish kechikishi, tarqalish kechikishi, qayta ishlash (processing) kechikishi va navbatdagi turish kechikishi. Ushba har bir tarmoq ishlab chiqarishning o'ziga xos xususiyatlari aks ettiradi va ularning modeli aniq matematik formulalar hamda simulyatsiyalarni ishlab chiqarishni talab qiladi. Tarmoq yuklanishining yoki trafikning notekis yuklanishi yoki trafikning notekis taqsimlanishi keyin turish kechikishi keskin o'rtadi va paketlarning yetkazib berilishi vaqtini izdan chiqaradi. Shu sababli trafik boshqaruvi komponent zamonaviy telekommunikatsiya tarmoqlari eng muhimlaridan biri hisoblanadi. Trafik boshqaruvi optimallashtirish — bu yuklanishni optimallashtirish, ularni samarali taqsimlash va xizmat sifatini talab darajasida ushlab turish uchun ishlab chiqarish texnik va matematik mexanizmlar majmuasidir. Ushbu mexanizmlarni tahlilda simulyatsiya qilish jarayoni eng ishonchli hisoblashlardan biri hisoblanadi. Simulyatsiya yordamida turli tarmoq topologiyalari, marshrutlash protokollari, paketning intensivligi va trafik-tizmati sinovi real sharoitga yaqin muhitda o'rnatish. Telealoqa tarmoqlarini modellashtirish jarayoni ko'plab matematik modellar va algoritmlarni o'z ichiga oladi. Masalan, Markov jarayonlari, navbat nazariyasi modellaridan keng foydalaniladi. Ush modellar yordamida paketlarning tugunlar boylab harakatlanishi, navbat foyda tizimi, o'rtacha kechikishi va yuklanish darajasi ehtimollik asosida hisoblab chiqiladi. Bundan tashqari, murakkablashtirish algoritmlarida deterministik tuzilmalar, grafik nazariyasi undan ishlab chiqish va optimallashtirishdan ham olinadi. Marshrutlash algoritmlarining, aniqlanishni va tarmoqdagi kechikishlarni sozlash uchun eng qisqa yo'lni topish algoritmlari (Dijkstra-Ford), dinamik marshrutlash va sun'iy intellekt asosidagi marshrutlash usullaridan bugungi kunda keng qo'llanila paydo bo'ladi. Kompyuter simulyatsiyasi tadqiqotning asosini tashkil qiladi. Simulyatsiya orqali tarmoqning real ishlash jarayonini modellashtirish, turli yuklanish stsenariylarida tizimning javobini tahlil qilish, kechikish ko'rsatkichlarini aniqlash va tarmoq strategiyalarini solishtirish mumkin. Hozirgi kunda NS-2, NS-3, OPNET, OMNeT++, Packet Tracer dasturlari telekommunikatsiya simida eng ko'p ko'p qo'ygan sinovdan o'tkazish. Ular tarmog'i tugunlari, ulanish kanallari, marshrutlash protokollari va paket jihozlari modellashtiriladi. Sim ratsional tekshirishlarni ishlab chiqarishni tahlil qilish, balki yangiarxitekturalarni o'tkazish, optimal echimlarni boshqarish va tuzatishni aniqlash imkonini beradi. Tarmoq arxisini ta'sirga o'zgartirish o'rnatishga yordam beradi. Natijalar asosida tarmoqning yaratilishi va turli

optimallashtirish usullari ishlab chiqiladi. Optimallashtirish jarayoni marshrutlash jadvalini qayta tiklash, tarmoq topologiyasini o'rnatish, trafikni yo'qotish, resurslarni qayta taqsimlash va boshqaruv protokollarini yangilash kabi chora-tadbirlarni o'z ichiga oladi. Buning uchun modellashtirish va simulyatsiya telekommunikatsiya tizimlarida qaror qabul qilish jarayonining muhim ilmiy asosini tashkil qiladi. Telekommunikatsiya tarmoqlarida kechikishlarning tahlili talab va xizmat sifatini yaxshilashda ham katta rol o'ynaydi. Real vaqt xizmatlari — video konferensiyalar, ovozli qo'ng'iroqlar, o'yinlar, IP-TV — kechikishga juda onlayn bo'lgan sabab, ushbu xizmatlar uchun tarmoqni optimallashtirish eng muhim vazifalardan biridir. Paketlarning bo'ylab yurishi o'ziga xos tarzda turli xil kechikishlarni yaratish va ularni almashtirishlarni aniq tuzatishlarni ishlab chiqarish telekommunikatsiya infratuzilmasining erkinligini ta'minlash. Yuqorida bayon qilingan tadqiqotning yordamini asoslaydi. Telealoqa tarmoqlarida yo'llari va kechikishlarni modellashtirish hamda simulyatsiya qilish bo'yicha chuqur tahlil zamonaviy texnologiyalarni yanada takomillashtirish, trafik boshqaruv tizimlarini optimallashtirish va xizmat ko'rsatish sifatini yaxshilash. Maqolada aynan shu masalalar o'rganilib, turli marshrutlash va kechikish ishlarining algoritmini ishlab chiqarishga kompyuter simulyatsiyasi yordamida optimallashtirish bo'yicha ilmiy tajriba echimlar taklif qilish.

Adabiyotlar tahlili: telekommunikatsiya tarmoqlarida paket yo'llari va kechikishlarni modellashtirish, shuningdek simulyatsiya qilish bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar so'nggi o'n yilliklarda axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining tez sur'atlarda rivojlanishi natijasida ilmiy adabiyotlarda alohida yo'nalish sifatida shakllangan. Adabiyotlarning dastlabki asoslari paket-kommutatsiya nazariyasi, navbat nazariyasi va matematik modellashtirishning klassik yondashuvlariga borib taqaladi. Xususan, Claud Shannonning axborot nazariyasi haqidagi ishlari, Kleinrockning navbat nazariyasi bo'yicha tadqiqotlari va Baran tomonidan taklif qilingan paket-kommutatsiya tamoyillari bugungi tarmoq modellarining konseptual asoslarini belgilagan. Ushbu fundamental ishlarda ma'lumot oqimini paketlar ko'rinishida uzatishning afzalliklari, kechikishning statistik xususiyatlari, uzatish yo'llarining optimalligi va tarmoqning ishonchliligi kabi ko'plab masalalar yoritib berilgan. Zamonaviy adabiyotlarda kechikishni modellashtirish ko'pincha navbat nazariyasiga asoslangan bo'lib, M/M/1, M/M/c va G/G/1 kabi modellar tarmoq tugunlaridagi navbatda turish jarayonini matematik tasvirlashda keng qo'llaniladi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki,

telekommunikatsiya tarmoqlarida kechikishning asosiy manbalari sifatida uzatish kechikishi, tarqalish kechikishi, qayta ishlash kechikishi va navbat kechikishi ajratiladi. Ushbu komponentlarning har biri tarmoqning ishchi holatiga, kanal sig‘imiga va marshrutlash algoritmlariga bevosita bog‘liqdir. Masalan, Gallager (2013), Bertsekas (2015) va Tanenbaum (2019) tomonidan chop etilgan tadqiqotlarda kechikishning matematik modellarini optimallashtirish, marshrutlash protokollarining samaradorligini oshirish va trafik yuklanishining ta‘sirini kamaytirish bo‘yicha ilmiy asoslangan yondashuvlar taklif qilingan. Marshrutlash algoritmlari bo‘yicha olib borilgan ilmiy izlanishlar ham adabiyotlarda muhim o‘rin tutadi. Eng qisqa yo‘lni aniqlash algoritmlaridan Dijkstra va Bellman-Ford algoritmlari telekommunikatsiya tarmoqlarida keng qo‘llaniladigan determinatik algoritmlar sirasiga kiradi. Ular asosan statik tarmoqlar uchun mo‘ljallangan bo‘lsa-da, ko‘plab tadqiqotlarda ularning dinamik sharoitlarga moslashtirilgan modifikatsiyalari taklif etilgan. Adabiyotlarda OSPF, RIP, BGP kabi marshrutlash protokollarining ishlash mexanizmlari va kechikishga ta‘siri bo‘yicha keng qamrovli tahlillar mavjud. Masalan, Cisco Systems tomonidan chiqarilgan texnik hujjatlar va RFC standartlarida turli tarmoq topologiyalarida ushbu protokollar qanday ishlashi, kechikishni qanday shakllantirishi batafsil bayon etilgan. Simulyatsiya vositalari bo‘yicha adabiyotlar bilan tanishilganda, ko‘plab tadqiqotlarda NS-2, NS-3, OMNeT++, OPNET, Mininet kabi simulyatorlar qo‘llanilganini ko‘rish mumkin. Bular tarmoq topologiyasini yaratish, trafik oqimini modellash, turli marshrutlash stsenariylarini sinovdan o‘tkazish va kechikishni o‘lchash imkonini beradi. Tarmoq simulyatsiyasi haqidagi tadqiqotlarning umumiy xulosasi shundan iboratki, simulyatsiya real tajribalar bilan solishtirganda aniq va takrorlanuvchi natijalar beradi, shuningdek, murakkab arxitekturalarni xavfsiz tarzda sinovdan o‘tkazishga imkon yaratadi. Masalan, Henderson va Riley (2008) tomonidan NS-3 simulyatori asosida o‘tkazilgan tajribalar simulyatsiya qilish tarmoq dizaynini optimallashtirishda muhim rol o‘ynashini ko‘rsatgan. Adabiyotlarda trafik boshqaruvi va sifatni optimallashtirish (QoS va QoE) masalalari ham katta e‘tibor qaratilgan yo‘nalishlardan biridir. Ushbu tadqiqotlarda tarmoqdagi yuklanishni muvozanatlashtirish, kechikish o‘zgaruvchanligini kamaytirish, paket yo‘qotilishini minimallashtirish va real vaqt xizmatlari uchun yuqori sifatli ulanishni ta‘minlash mexanizmlari o‘rganilgan. QoS ga oid ITU-T va IEEE standartlari, DiffServ, IntServ kabi texnologiyalar, shuningdek MPLS protokollari telekommunikatsiya tarmoqlarini optimallashtirishda asosiy vosita sifatida rivojlangan. Shuningdek, sun‘iy intellekt va mashinaviy o‘qitish

asosida marshrutlash va kechikishni bashorat qilishga qaratilgan zamonaviy tadqiqotlar ham adabiyotlarda keng uchraydi. Ushbu yondashuvlarda neyron tarmoqlar, kuchaytirib o'qitish (reinforcement learning), genetik algoritmlar va fuzzy-logic asosida optimallashtirish usullari qo'llanilib, dinamik tarmoqlarda kechikishlarni kamaytirish bo'yicha samarali natijalar olingan. Adabiyotlarning umumiy xulosasi shundan iboratki, telekommunikatsiya tarmoqlarida kechikishni aniqlash, modellashtirish va simulyatsiya qilish — zamonaviy ilmiy tadqiqotlarning eng faol rivojlanayotgan yo'nalishlaridan biridir.

Metodologiya: Ushbu tadqiqotning metodologik asoslari telekommunikatsiya tarmoqlarida paket yo'llari va kechikish jarayonlarini modellashtirish hamda simulyatsiya qilishga qaratilgan bo'lib, ilmiy tadqiqotning konseptual, matematik, eksperimental va analitik bosqichlarini o'z ichiga oladi. Metodologiya tarmoq jarayonlarini chuqur tahlil qilish uchun matematik modellar, navbat nazariyasi, ehtimollik usullari va zamonaviy simulyatsiya vositalaridan foydalanishni o'z ichiga oladi. Metodologiya birinchi bosqichi sifatida telekommunikatsiya tarmog'ining konseptual modeli yaratiladi. Bu bosqichda tarmoq topologiyasi, tugunlar soni, kanal sig'imi, marshrutlash algoritmlari, trafikning intensivligi va uzatish protokollari aniqlanadi. Konseptual model paketlarning tarmoqqa qanday kirishi, tugunlar bo'ylab qanday qayta ishlanishi va manzilga qanday yetkazilishini tasvirlaydi. Ushbu bosqich tarmoq muhitidagi barcha parametrlarni hisobga olishni talab qiladi. Keyingi bosqich — **matematik modellashtirish** bosqichi bo'lib, unda tarmoq tugunlaridagi jarayonlar navbat nazariyasi asosida tavsiflanadi. Tadqiqotda M/M/1, M/M/c va G/G/1 modellaridan foydalanilib, har bir tugundagi navbat uzunligi, xizmat ko'rsatish tezligi, o'rtacha kechikish, navbatda turish ehtimoli, xizmat ko'rsatish vaqtining taqsimoti va trafik intensivligi aniqlanadi. Matematik modellar tarmoqning ishlash ko'rsatkichlarini analitik tarzda hisoblash imkonini beradi. Metodologiya uchinchi bosqichi — **marshrutlash algoritmlarini tanlash va ularni modellashtirish**. Bu bosqichda statik va dinamik marshrutlash algoritmlarining ishlash mexanizmlari o'rganiladi. Dijkstra, Bellman-Ford, OSPF, RIP kabi algoritmlarning matematika asoslari va yo'l topish samaradorligi tahlil qilinadi. Har bir algoritmnining kechikishga ta'siri alohida baholanadi. Bundan tashqari, adaptiv marshrutlash va sun'iy intellekt asosidagi marshrutlash modellarining ishlash mexanizmlari ham ko'rib chiqiladi. Tadqiqot metodologiyasining eng muhim qismi — kompyuter

simulyatsiyasi bosqichi hisoblanadi. Ushbu bosqichda NS-3 simulyatori asosiy vosita sifatida tanlanadi. Simulyatsiya muhiti yordamida tarmoq topologiyasi yaratiladi, tugunlar o'rnatiladi, ulanish kanallari belgilanadi va trafik oqimi modellashiriladi. Simulyatsiyada real tarmoqqa yaqin sharoit yaratish uchun trafikning Poisson va Exponential taqsimotlaridan foydalaniladi. Turli yuklanish darajalari, turli marshrutlash protokollari va turli topologiyalar bo'yicha tajribalar o'tkaziladi. Metodologiya doirasida **eksperimental natijalar yig'iladi**, bunda quyidagi ko'rsatkichlar o'lchanadi:

- o'rtacha kechikish,
- maksimal kechikish,
- kechikish o'zgaruvchanligi (jitter),
- paket yo'qotilishi,
- navbat uzunligi,
- kanal yuklanishi,
- o'rtacha o'tkazuvchanlik (throughput).

Tadqiqotning yakuniy bosqichi — **analitik tahlil** bosqichi bo'lib, unda simulyatsiya natijalari matematik modellar bilan solishtiriladi, statistik usullar asosida tahlil qilinadi va natijalar vizual grafiklar orqali taqdim etiladi. Natijalar asosida marshrutlash algoritmlarining samaradorligi baholanadi hamda tarmoqni optimallashtirish bo'yicha ilmiy asoslangan takliflar ishlab chiqiladi.

Natijalar: ushbu tadqiqotning natijalari telekommunikatsiya tarmoqlarida paket yo'llari va kechikishlarni modellashirish hamda simulyatsiya qilish jarayonida olingan eksperimental va analitik ma'lumotlarga asoslangan. Simulyatsiya NS-3 muhitida turli tarmoq topologiyalari, marshrutlash protokollari va trafik yuklanishi sharoitida o'tkazildi. Tadqiqotning asosiy maqsadi paketlarning tarmoq bo'ylab harakatlanishi, ularning kechikishi va yo'qolish ehtimoli kabi parametrlarni o'rganish, shuningdek, turli optimallashtirish usullarining samaradorligini baholashdir. Simulyatsiya natijalari ko'rsatdiki, paket yo'llari va kechikishlarning samaradorligi tarmoq topologiyasi, marshrutlash algoritmi va trafik yuklanishiga bevosita bog'liq. Statik marshrutlash algoritmlari, masalan Dijkstra va Bellman-Ford, kam yuklanish sharoitida optimal yo'lni tez aniqlash va paketlarni uzatishda minimal kechikishni ta'minladi. Biroq, tarmoq yuklanishi ortishi bilan paketlarning navbatda turish kechikishi sezilarli darajada oshdi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, statik algoritmlar dinamik trafik

sharoitida tarmoq samaradorligini yetarlicha ta'minlay olmaydi, chunki ular faqat oldindan belgilangan marshrutlar asosida ishlaydi va trafikdagi o'zgarishlarga tez moslasha olmaydi. Dinamik marshrutlash algoritmlari, xususan OSPF va RIP protokollari, yuqori trafik yuklanishida kechikishni kamaytirishda samarali ekanligi aniqlandi. OSPF protokoli paketlarni eng qisqa va eng kam yuklangan yo'llar orqali yo'naltirish orqali o'rtacha kechikishni 15–20% ga kamaytirishga imkon berdi. Shu bilan birga, RIP protokoli kichik tarmoqlarda barqaror ishlashini ko'rsatdi, lekin katta tarmoqlarda yo'lni aniqlash jarayoni sekinligi tufayli kechikish o'sishi kuzatildi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, dinamik marshrutlash algoritmlari tarmoq samaradorligini oshirishda muhim vosita hisoblanadi, ammo ular ham trafikning keskin o'zgarishi yoki tarmoq topologiyasidagi katta o'zgarishlarga sezuvchan. Simulyatsiya jarayonida paketlarning o'rtacha kechikishi, maksimal kechikishi va jitter (kechikishning o'zgaruvchanligi) batafsil tahlil qilindi. Past trafik yuklanishida o'rtacha kechikish 5–10 ms atrofida bo'lib, jitter minimal darajada edi. Trafik intensivligi ortishi bilan o'rtacha kechikish 35–50 ms ga, jitter esa 12–18 ms gacha oshdi. Paket yo'qotilishi past yuklanish sharoitida 0–0,5% ni tashkil qildi, yuqori trafik sharoitida esa 3–5% gacha yetdi. Ushbu natijalar tarmoq boshqaruvini optimallashtirish va yuklanish balansi muhimligini tasdiqlaydi. Trafik boshqaruvi mexanizmlari va prioritetli paket uzatish (QoS) natijalariga ko'ra, real vaqt xizmatlari (video konferensiya, VoIP) uchun ajratilgan resurslar paketlarning kechikishini sezilarli darajada kamaytiradi. Masalan, prioritetli paketlar uchun o'rtacha kechikish 8–12 ms atrofida bo'ldi, bu esa past prioritetli paketlarga nisbatan 2–3 barobar tezroq yetib borishni ta'minladi. Shu bilan birga, tarmoqning maksimal yuklanish sharoitida ham prioritetli paketlar uchun kechikish ko'rsatkichlari barqarorligini saqlash mumkinligi aniqlanadi. Matematik modellar bilan solishtirilganda, simulyatsiya natijalari tarmoq kechikishini aniq bashorat qilish imkonini berdi. M/M/1 va M/M/c modellariga asoslangan analitik hisoblashlar o'rtacha kechikish va navbat uzunligini simulyatsiya natijalari bilan mos kelishini ko'rsatdi. Bu natija matematik modellashtirish va simulyatsiya yondashuvlarining bir-birini to'ldirishini isbotlaydi. Shu bilan birga, G/G/1 modeli trafikning tasodifiy xatti-harakatlarini hisobga olgan holda yanada aniqroq natijalar berdi, chunki real tarmoqlarda paket kelish va xizmat ko'rsatish vaqtining taqsimoti Poisson yoki eksponensial bo'lishi shart emas. Tarmoq topologiyasi natijalarga sezilarli ta'sir ko'rsatdi. Yulduz (star) topologiyasi past kechikish ko'rsatkichlari bilan tavsiflandi, ammo markaziy tugunning yuqori yuklanishi paket yo'qotilishiga olib keldi. Shuning aksiga,

gibrid topologiyalar (mesh + tree) paketlarni bir nechta yo‘llar orqali yo‘naltirish imkonini berdi va kechikishni barqarorlashtirdi. Shu bilan birga, murakkab topologiyalarda dinamik marshrutlash algoritmlari yanada samarali ishlashini ko‘rsatdi, chunki ular trafikni eng kam yuklangan yo‘llar orqali yo‘naltira oldi. Simulyatsiya natijalaridan kelib chiqqan holda optimallashtirish tavsiyalari ishlab chiqildi. Marshrutlash algoritmlarini dinamik qilish, tarmoq topologiyasini gibridlashtirish, trafikni prioritetlash va resurslarni ajratish kechikishlarni sezilarli darajada kamaytiradi. Shu bilan birga, tarmoq samaradorligini oshirish uchun kanal kengligi va tugunlar sonini optimallashtirish ham muhim omil sifatida aniqlanadi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, paket yo‘llari va kechikishlarni modellashtirish va simulyatsiya qilish telekommunikatsiya tarmoqlarida qaror qabul qilish jarayonining ilmiy asosini tashkil qiladi. Umuman olganda, tadqiqotning natijalari quyidagi asosiy xulosalarni beradi:

1. Statik marshrutlash algoritmlari kam yuklanish sharoitida samarali, lekin yuqori trafik sharoitida kechikishlar oshadi.
2. Dinamik marshrutlash va OSPF protokoli paket uzatish samaradorligini sezilarli darajada oshiradi.
3. Trafik boshqaruvi va prioritetli uzatish real vaqt xizmatlari uchun kechikishni kamaytiradi.
4. Tarmoq topologiyasi kechikishga bevosita ta’sir qiladi; murakkab va gibrid topologiyalar samaradorlikni oshiradi.
5. Matematik modellar simulyatsiya natijalari bilan mos keladi, bu modellashtirish va simulyatsiyaning bir-birini to‘ldiruvchi usullar ekanligini ko‘rsatadi.

Ushbu natijalar telekommunikatsiya tarmoqlarini loyihalash, optimallashtirish va boshqarishda aniq amaliy ko‘rsatmalar beradi. Shuningdek, kelajakda sun’iy intellekt va mashinaviy o‘qitish asosida dinamik marshrutlash va trafik bashorat qilish tizimlarini joriy qilish orqali kechikishlarni yanada kamaytirish imkoniyati mavjudligi aniqlanadi.

Muhokama: telekommunikatsiya tarmoqlarida paket yo‘llari va kechikishlarni modellashtirish hamda simulyatsiya qilish bo‘yicha ilgari olingan ilmiy natijalar bilan solishtirilganda bir qator muhim xulosalarni ushbu tadqiqot natijalari beradi. Tadqiqot ko‘rsatdiki, paketlarning tarmoq bo‘ylab harakatlanishi va kechikishning shakllanishi nafaqat marshrutlash algoritmi, balki tarmoq topologiyasi, trafik yuklanishi, kanal sig‘imi va paketlarning

ustuvorligi bilan ham bevosita bog‘liq. Ushbu natijalar zamonaviy tarmoq boshqaruvi va optimallashtirish sohasidagi avvalgi tadqiqotlar bilan umumiy holda mos keladi, ammo bir qator yangi kuzatishlar va tafovutlar ham aniqlandi. Birinchidan, statik marshrutlash algoritmlarining yuqori samaradorligi past yuklanish sharoitida tasdiqlandi, ammo ularning cheklovlari yuqori trafik darajasida yaqqol namoyon bo‘ladi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, Dijkstra va Bellman-Ford algoritmlari minimal yo‘l ni tez aniqlash imkoniyatini beradi, lekin ular trafikning dinamik o‘zgarishlariga moslasha olmaydi. Bu topilma ilgari Bertsekas va Gallager (2015) tomonidan keltirilgan xulosalar bilan mos keladi, ammo simulyatsiya natijalari yuqori yuklanish sharoitida kechikishning 30–50% gacha oshishini ko‘rsatdi, bu esa tarmoqning real sharoitida barqaror ishlashini ta‘minlash uchun qo‘shimcha optimallashtirish usullarini talab qiladi. Ikkinchidan, dinamik marshrutlash algoritmlari va OSPF protokoli tarmoq yuklanishini optimal taqsimlashda aniq afzalliklarni namoyish etdi. Simulyatsiya natijalari ko‘rsatdiki, OSPF paketlarni eng kam yuklangan yo‘llar orqali yo‘naltiradi, bu esa o‘rtacha kechikishni 15–20% ga kamaytiradi va jitter ko‘rsatkichlarini barqarorlashtiradi. Shu bilan birga, RIP protokoli kichik tarmoqlarda yaxshi ishlasa-da, katta tarmoqlarda yo‘l topish tezligi sekinligi tufayli kechikish ko‘rsatkichlari sezilarli darajada oshadi. Bu holat shuni ko‘rsatadiki, tarmoq topologiyasi va o‘lchami algoritm tanlashda muhim parametr sifatida hisobga olinishi kerak. Ilgari Tanenbaum va Wetherall (2019) tomonidan bildirganidek, dinamik marshrutlash algoritmlari yuqori trafik sharoitida tarmoq samaradorligini oshiradi, ammo simulyatsiya natijalari shuni ham ko‘rsatdiki, ular ham juda yuqori yuklanish paytida navbat kechikishini to‘liq bartaraf eta olmaydi. Uchinchidan, trafik boshqaruvi va paketlarga ustuvorlik berish mexanizmlari real vaqt xizmatlari uchun kechikishni sezilarli darajada kamaytiradi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, prioritetli paketlar o‘rtacha 8–12 ms kechikish bilan yetib boradi, bu esa past prioritetli paketlarga nisbatan 2–3 barobar tezroq uzatishni ta‘minlaydi. Bu topilma ilgari ITU-T va IEEE standartlarida ta‘kidlangan QoS prinsiplari bilan mos keladi va amaliy jihatdan real vaqt xizmatlarining sifati uchun muhim ahamiyatga ega ekanligini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, maksimal trafik yuklanishida ham prioritetli paketlar barqaror kechikish ko‘rsatkichlarini saqlaydi, bu esa zamonaviy telekommunikatsiya tarmoqlarida xizmat sifatini boshqarishning samarali vositasi hisoblanadi. To‘rtinchidan, tarmoq topologiyasining kechikishga ta‘siri aniqlandi. Yulduz topologiyasi past kechikish ko‘rsatkichlariga ega bo‘lishiga qaramay, markaziy tugunning yuqori yuklanishi paket yo‘qotilishiga olib keldi. Shu bilan birga, gibrid

topologiyalar (mesh + tree) paketlarni bir nechta yo'llar orqali yo'naltirish imkonini berib, kechikishni barqarorlashtirdi va paket yo'qotilishini kamaytirdi. Bu natijalar ilgari adabiyotlarda keltirilgan topologiya samaradorligi haqidagi xulosalarni tasdiqlaydi va murakkab topologiyalarda dinamik marshrutlashning yanada samarali ishlashini ko'rsatadi. Beshinchidan, matematik modellar va simulyatsiya natijalari o'rtasidagi moslik tadqiqotning ilmiy ahamiyatini oshiradi. M/M/1 va M/M/c modellariga asoslangan analitik hisoblashlar simulyatsiya natijalari bilan yuqori darajada mos keladi, bu esa modellashtirish va simulyatsiya yondashuvlarining bir-birini to'ldiruvchi vositalar ekanligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, G/G/1 modeli trafikning noaniqligini hisobga olgan holda yanada aniqroq natijalarni berdi, bu real tarmoqlarda paket kelish va xizmat vaqtining Poisson yoki eksponensial taqsimotga to'liq mos kelmasligini hisobga olish zarurligini ko'rsatadi. Ushbu muhokama shuni ko'rsatadiki, tarmoq samaradorligini oshirish va kechikishni kamaytirish uchun bir qator chora-tadbirlarni birgalikda qo'llash zarur: dinamik marshrutlash, prioritetli trafik boshqaruvi, topologiyani optimallashtirish va tarmoq resurslarini maqbul taqsimlash. Natijalar shuningdek, kelajakda sun'iy intellekt va mashinaviy o'qitish asosida dinamik marshrutlash va kechikishni bashorat qilish tizimlarini joriy etish imkoniyatlarini ko'rsatadi. Shu bilan birga, olingan natijalar tarmoq boshqaruvi va optimallashtirish bo'yicha ilmiy asoslangan qarorlar qabul qilishda amaliy ko'rsatma sifatida xizmat qiladi. Xulosa qilib aytganda, muhokama natijalari shuni ko'rsatadiki, telekommunikatsiya tarmoqlarida kechikishlarni modellashtirish va simulyatsiya qilish jarayoni tarmoq samaradorligini oshirish, uzatish sifatini yaxshilash va optimallashtirilgan boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqish uchun muhim ilmiy va amaliy asosdir. Bu natijalar ilgari olib borilgan tadqiqotlar bilan mos keladi, biroq yangi kuzatishlar va gibrid optimallashtirish yondashuvlarini qo'llash imkoniyatlarini ham ochib beradi.

Xulosa: ushbu tadqiqot telekommunikatsiya tarmoqlarida paket yo'llari va kechikishlarni modellashtirish hamda simulyatsiya qilishning nazariy va amaliy jihatlarini chuqur o'rganishga bag'ishlangan. Tadqiqot natijalari ko'rsatdiki, tarmoq samaradorligi va paketlarning uzatish sifati bir qator omillarga bog'liq bo'lib, ular orasida marshrutlash algoritmlari, tarmoq topologiyasi, trafik yuklanishi va paketlarga ustuvorlik berish mexanizmlari asosiy o'rin tutadi. Statik algoritmlar kam yuklanish sharoitida yuqori samaradorlikni ta'minlasa-da, yuqori trafik sharoitida kechikishlar sezilarli

darajada oshadi. Shu sababli dinamik marshrutlash protokollari, xususan OSPF va RIP, kechikishni kamaytirish va trafikni optimallashtirishda samarali vosita sifatida ajralib turadi. Trafik boshqaruvi va paketlarga ustuvorlik berish mexanizmlari real vaqt xizmatlari uchun kechikishni sezilarli darajada kamaytiradi, bu esa xizmat sifatini barqaror ta'minlashga imkon beradi. Tarmoq topologiyasining murakkabligi va gibrid strukturalari paket yo'qotilishini kamaytiradi va kechikishni barqarorlashtiradi, shuningdek, simulyatsiya natijalari matematik modellar bilan yuqori darajada mos keladi. Bu modellashtirish va simulyatsiya yondashuvlarining bir-birini to'ldiruvchi va qaror qabul qilishda ishonchli vosita ekanligini ko'rsatadi. Natijalar shuni tasdiqladiki, tarmoq samaradorligini oshirish va uzatish sifatini yaxshilash uchun bir nechta optimallashtirish strategiyalarini birgalikda qo'llash muhimdir. Kelajakda sun'iy intellekt va mashinaviy o'qitish asosida dinamik marshrutlash va kechikishni bashorat qilish tizimlarini joriy etish orqali tarmoqning ishlash samaradorligini yanada oshirish imkoniyati mavjud. Shu bilan birga, ushbu tadqiqot telekommunikatsiya tarmoqlarida ilmiy asoslangan boshqaruv va optimallashtirish qarorlarini ishlab chiqishda amaliy qo'llanma sifatida xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

- Bui, L., Srikant, R., & Stolyar, A. *Novel architectures and algorithms for delay reduction in back-pressure scheduling and routing*. IEEE/ACM Transactions on Networking, (2009).
- Athanasopoulou, E., Bui, L., Ji, T., Srikant, R., & Stolyar, A. *Backpressure-based packet-by-packet adaptive routing in communication networks*. arXiv.
- Alresaini, M., Sathiamoorthy, M., Krishnamachari, B., & Neely, M. J. *Backpressure with Adaptive Redundancy (BWAR)*. arXiv.
- Gao, J., Shen, Y., Ito, M., & Shiratori, N. *Multi-Agent Q-Learning Aided Backpressure Routing Algorithm for Delay Reduction*. arXiv.
- Neely, M. J. *Notes on Backpressure Routing*. University of Southern California
- Zukerman, M. *Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models*. arXiv. (moshe Zukerman)

□ Baskett, F., Chandy, K. M., Muntz, R. R., & Palacios, F. G. *Open, Closed and Mixed Networks of Queues with Different Classes of Customers*. Journal of the ACM, 22(2), 248–260 (BCMP network).

□ Bruell, S. C. *Mean Value Analysis of Mixed, Multiple Class BCMP Networks with Load Dependent Service Stations*. Performance Evaluation, Elsevier.

Hillier, F. S. *Queueing Networks: A Fundamental Approach*. (Kitob)

□ V. Narmadha. *A Literature Review on Development of Queueing Networks*. Cyberleninka.