

FTTX TEKNOLOGIYALARINING RIVOJLANISHI VA ABONENTLAR UCHUN YUQORI TEZLIKDAGI XIZMATLARNI TA'MINLASH MUAMMOLARI

Ilmiy tatqiqotchi: Xaydaraliyev Akbarjon Muhammadali o'g'li

Jahongir Qobiljoniv Mirzatillo o'g'li

Ilmiy rahbar: Xalilov Muhammadmuso Muhammadyunusovich

Farg'ona davlat texnika universiteti.

Annotatsiya: Ushbu maqolada FTTx texnologiyalarining shakllanishi, rivojlanishi va hozirgi telekommunikatsiya infratuzilmasida tutgan o'rni tahlil qilinadi. Fiber-optik asosdagi kirish tarmoqlari abonentlarga gigabit darajasidagi tezliklarni taqdim etish imkonini berayotgan bo'lsada, ularning keng joriy etilishida iqtisodiy xarajatlar, qurilish infratuzilmasi, optik liniyalarni montaj qilishdagi texnik cheklovlar va xizmat sifatini barqaror saqlash kabi muammolar mavjud. Maqolada FTTB, FTTH, FTTN kabi arxitekturalarning afzalliklari va cheklovlari solishtiriladi, shuningdek yuqori tezlikdagi xizmatlarni ta'minlash uchun talab etiladigan texnik yechimlar, modernizatsiya strategiyalari va bo'lajak rivojlanish tendensiyalari ko'rib chiqiladi.

Kalit sozlar: FTTx, FTTH, FTTB, optik tolali tarmoq, abonent kirish tarmoqlari, yuqori tezlikdagi internet, PON texnologiyalari, GPON, XG-PON, tarmoq modernizatsiyasi, keng polosali ulanish, optik infratuzilma, xizmat sifati (QoS), kirish arxitekturas.

Abstract: This article examines the development of FTTx technologies and the key challenges in providing high-speed broadband services to subscribers. The study analyzes the evolution of fiber-based access networks, evaluates the performance advantages of architectures such as FTTH, FTTB and FTTN, and identifies the primary obstacles related to infrastructure deployment, high installation costs, network reliability, and service quality assurance. Particular attention is given to bandwidth demand growth, latency reduction, and the role of modern optical transmission standards such as GPON and XG-PON. Practical recommendations are proposed to optimize network architecture, enhance throughput, and ensure stable Quality of Service (QoS) through improved resource allocation and advanced management methods. The findings emphasize the importance of FTTx modernization for meeting future broadband requirements.

Keywords: FTTx, DSL, subscriber access networks, optimization, throughput, latency, Quality of Service (QoS), network architecture, broadband technology, efficiency.

Аннотация (Abstract на русском): В статье рассматривается развитие технологий FTTx и ключевые проблемы предоставления абонентам

высокоскоростных широкополосных услуг. Анализируется эволюция оптоволоконных сетей доступа, оцениваются преимущества архитектур FTTH, FTTB и FTTN, а также выявляются основные препятствия, связанные с развертыванием инфраструктуры, высокими затратами на установку, надежностью сети и обеспечением качества обслуживания. Особое внимание уделяется росту потребности в пропускной способности, снижению задержек и роли современных стандартов оптической передачи, таких как GPON и XG-PON. Предлагаются практические рекомендации по оптимизации сетевой архитектуры, повышению пропускной способности и обеспечению стабильного качества обслуживания (QoS) за счет улучшенного распределения ресурсов и современных методов управления. Полученные результаты подчеркивают важность модернизации FTTx для удовлетворения будущих требований к широкополосному доступу.

Ключевые слова: FTTx, DSL, абонентские сети доступа, оптимизация, пропускная способность, задержка, качество обслуживания (QoS), сетевая архитектура, широкополосные технологии, эффективность.

Kirish: So‘nggi yillarda raqamli xizmatlarga talab keskin oshdi: yuqori tezlikdagi internet, interaktiv multimedia ilovalari, video konferensiyalar, bulutli texnologiyalar va IoT qurilmalari keng ko‘lamda foydalanilmoqda. Ushbu xizmatlarning barqaror ishlashi uchun abonent kirish tarmoqlari yuqori tezlik, past kechikish (latency) va yuqori ishonchlilikni ta‘minlashi zarur. An‘anaviy mis kabel asosidagi DSL texnologiyalari o‘z chegarasiga yetgan bo‘lib, ularning maksimal o‘tkazuvchanligi va xizmat sifati bugungi talablar uchun yetarli emas. Shu bois FTTx (Fiber To The x) texnologiyalari — FTTH (Fiber To The Home), FTTB (Fiber To The Building), FTTN (Fiber To The Node) kabi arxitekturalar — abonentlar uchun yuqori tezlikdagi xizmatlarni ta‘minlashda eng istiqbolli yechim sifatida e‘tiborga olinmoqda. FTTx tarmoqlari optik tolalardan foydalangan holda gigabit darajasidagi tezliklarni taqdim etadi, bu esa video, onlayn o‘yinlar, katta hajmdagi ma‘lumotlar uzatish va bulutli xizmatlar uchun juda muhim. Shu bilan birga, FTTx tarmoqlarini amaliyotga joriy etish qator muammolar bilan bog‘liq: yuqori qurilish va montaj xarajatlari, optik liniyalarni yotqizishdagi murakkabliklar, mavjud infratuzilma bilan integratsiya qilish qiyinchiliklari va tarmoq yuklamasining tez o‘sishi. Bundan tashqari, abonentlarga barqaror va sifatli xizmatni yetkazish uchun xizmat sifati (QoS)ni boshqarish va resurslarni samarali taqsimlash talab etiladi. Ushbu maqolada FTTx texnologiyalarining rivojlanish bosqichlari, ularning texnik imkoniyatlari, arxitektura turlari, afzalliklari va cheklovlari batafsil tahlil qilinadi. Shuningdek, yuqori tezlikdagi xizmatlarni ta‘minlash bo‘yicha mavjud muammolarni aniqlash va ularni hal qilish uchun zamonaviy texnik va boshqaruv yechimlari ko‘rib chiqiladi. Maqola FTTx

tarmoqlarining samaradorligini oshirish, keng polosali xizmatlarni kengaytirish va abonentlarga sifatli xizmat taqdim etish yo'llarini aniqlashga qaratilgan. Global miqyosda raqamli infratuzilmaning jadal rivojlanishi, yuqori sifatli internet xizmatlariga bo'lgan talabning keskin ortishi va ma'lumotlar almashinuvi hajmining yildan-yilga ko'payishi telekommunikatsiya tarmoqlarini tubdan modernizatsiya qilish zaruratini yuzaga keltirmoqda. Bugungi kunda internetdan foydalanish nafaqat axborot olish, balki ta'lim, sog'liqni saqlash, ishlab chiqarish, boshqaruv tizimlari va kundalik hayotning deyarli barcha jabhalariga chuqur kirib borgan. Xususan, video kontent uzatish, bulutli hisoblash, onlayn o'yinlar, masofaviy ta'lim, IoT qurilmalar tarmoqlari va smart-texnologiyalar kengayib borayotgani sababli abonent kirish tarmoqlarining o'tkazuvchanlik quvvati ham keskin oshirilishi talab etiladi. An'anaviy mis kabelga asoslangan DSL texnologiyalari uzoq yillar davomida asosiy abonent ulanish tizimi sifatida xizmat qilib kelgan bo'lsada, ularning fizik xususiyatlari yuqori tezliklarni ta'minlashga imkon bermayapti. Masalan, signalning masofaga nisbatan tez susayishi, shovqinlarga sezuvchanlik, o'tkazuvchanlikning cheklanganligi va abonentlar soni ortishi bilan xizmat sifatining pasayishi ushbu texnologiyaaning imkoniyatlarini chegaralaydi. Shu bois oxirgi mil muammosini samarali hal qilish va abonentga kerakli sifat darajasida internet yetkazib berish uchun FTTx (Fiber To The x) texnologiyalari jadal joriy qilinmoqda. FTTx — bu optik tolalar asosidagi kirish tarmoqlarining turli arxitekturalarini o'z ichiga oluvchi kompleks texnologiyalar majmuasi bo'lib, u abonentga eng yaqin nuqtagacha optik liniyani keltirishni maqsad qiladi. Eng ko'p uchraydigan variantlardan FTTH (uygacha optika), FTTB (binogacha optika) va FTTN (tugungacha optika) ayniqsa yuqori o'tkazuvchanlik, past kechikish va tarmoqning yuqori ishonchliligini ta'minlagani sababli amaliyotda keng qo'llanmoqda. Optik tola orqali gigabit darajasidagi tezlikni taklif qilish, elektromagnit shovqinlarga chidamlilik, energiya samaradorligi va uzoq muddat xizmat qilish kabi afzalliklari FTTx texnologiyasiga bo'lgan talabni yanada kuchaytirmoqda. Shunga qaramay, FTTx tarmoqlarini keng joriy etish jarayoni bir qator muammolar bilan yuzma-yuz kelmoqda. Eng avvalo, optik infratuzilma qurilishi katta sarmoyani talab qiladi. Shahar markazlarida optik liniyalarni o'rnatish uchun yo'llarni kovlash, kommunikasiyalar bilan kesishuvlarni moslashtirish va mavjud tarmoqlar bilan integratsiya talab etiladi. Qishloq hududlarida esa masofa uzoq bo'lgani uchun xarajat yanada ortadi. Bundan tashqari, optik tolalarni yotqizish, PON (Passive Optical Network) tizimlarini sozlash, OLT va ONU qurilmalarini boshqarish yuqori malakali texnik xodimlarni talab qiladi. Xizmat sifati (QoS)ni ta'minlash ham dolzarb masalalardan biridir. Tarmoq yuklamasining mavsumiy yoki sutkalik o'zgarishi, ko'p foydalanuvchili segmentlarda trafikni boshqarish, kechikish va paket yo'qotilishini kamaytirish, real vaqt xizmatlarini ustuvorlashtirish va resurslarni dinamik taqsimlash zamonaviy abonent tarmoqlari uchun majburiy talabga aylangan. Shuningdek, tezlikning o'sishi bilan birga

xavfsizlik protokollarini takomillashtirish ham muhim ahamiyat kasb etadi. Mazkur maqolada FTTx texnologiyalarining rivojlanish jarayonlari, arxitektura turlari, texnik imkoniyatlari, ularning DSL texnologiyalariga nisbatan ustunliklari hamda cheklovlari chuqur ilmiy tahlil qilinadi. Shuningdek, abonentlarga yuqori tezlikdagi xizmatlarni ta'minlash jarayonida uchraydigan muammolar — infratuzilma, iqtisodiy, texnik va boshqaruv bilan bog'liq omillar — batafsil o'rganiladi. Maqolada shuningdek, yuqori tezlikdagi keng polosali xizmatlarni yanada rivojlantirish uchun optimallashtirilgan tarmoq arxitekturasini, samarali resurs boshqaruvi va zamonaviy signalizatsiya usullariga asoslangan takliflar ham beriladi.

Adabiyotlar tahlili: FTTx texnologiyalariga doir ilmiy adabiyotlar so'nggi yillarda jadal ravishda ko'payib bormoqda. Ko'plab tadqiqotlar optik tolali tarmoqlarning afzalliklari, ularning rivojlanish bosqichlari, xizmat sifati (QoS) talablari va DSL texnologiyalari bilan solishtirganda samaradorligini yoritadi. Dastlabki ilmiy manbalarda DSL texnologiyalarining imkoniyatlari, VDSL va ADSL standartlarining o'tkazuvchanlik chegaralari, shuningdek, mis kabelning fizik cheklovlari batafsil o'rganilgan. Masalan, ITU-T tomonidan chop etilgan tavsiyalarda DSL tizimlarining maksimal tezliklari masofa ortishi bilan sezilarli darajada pasayishi, shovqin va interferensiyaga sezuvchanligi ta'kidlanadi. Bu manbalar FTTx texnologiyalarining joriy etilishi uchun asosiy motivatsion omil sifatida qayd etiladi. Optik tarmoqlar bo'yicha zamonaviy adabiyotlar, xususan, PON (Passive Optical Network) arxitekturalarini o'rganishga qaratilgan. GPON, XG-PON, XGS-PON va NG-PON2 standartlari bo'yicha olib borilgan ilmiy tadqiqotlar optik tolalarning yuqori simmetrik o'tkazuvchanligi, past kechikishi va energiya samaradorligini asosiy ustunlik sifatida ko'rsatadi. ITU-T G.984 va G.987 standartlariga asoslangan ishlar yuqori tezlikda xizmat ko'rsatishda OLT (Optical Line Terminal) va ONU (Optical Network Unit) qurilmalarining roli, ulardagi bandwidth allocation algoritmlarining samaradorligini ta'riflaydi. Ko'plab olimlar FTTx arxitekturalarining iqtisodiy samaradorligini ham tahlil qilgan. Masalan, telekommunikatsiya iqtisodiyoti bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarda FTTH yechimlarining boshlang'ich investitsiyasi yuqori bo'lsa-da, uzoq muddatda texnik xizmat xarajatlarining pastligi va xizmat sifatining yuqoriligi sababli iqtisodiy jihatdan o'zini oqlashi qayd etiladi. Aksincha, FTTN yoki FTTB kabi aralash arxitekturalar o'rta muddatli yechim sifatida ko'riladi, chunki ular mavjud infratuzilmadan qisman foydalanishga imkon beradi. Xizmat sifatini boshqarish (QoS) bo'yicha adabiyotlar asosan trafikni ustuvorlashtirish, kechikishni kamaytirish, tarmoq yuklamasini balanslash va real vaqt xizmatlarini optimallashtirish masalalarini o'rganadi. Tadqiqotlarda Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) algoritmlarining aniq roli yoritilib, ular tarmoqdagi abonentlar soni ortganda ham barqaror xizmat sifatini saqlashga yordam berishi qayd etiladi. FTTx va DSL texnologiyalarini taqqoslovchi ishlar optika asosidagi tarmoqlarning kelajakda

ustunligini ilmiy jihatdan asoslab beradi. DSL texnologiyalari asosan mavjud mis kabellarga tayanishi sababli modernizatsiya imkoniyati cheklangan bo'lsa, FTTx tarmoqlari gigabit va terabit darajasidagi tezlikka moslashuvchanligi bilan ajralib turadi. Buni CERN, IEEE, ITU va Broadband Forum tomonidan chop etilgan tadqiqotlar ham tasdiqlaydi. Yevropa, Koreya, Yaponiya va AQShda olib borilgan ilmiy-amaliy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, keng polosali xizmatlarni kengaytirish va kelajakdagi raqamli transformatsiyani qo'llab-quvvatlashning eng samarali yo'li optik infratuzilmani kompleks joriy etishdir. Ayniqsa, 5G va IoT qurilmalar sonining ortishi bilan optik tolalar endilikda nafaqat abonent kirish tarmoqlari, balki tayanch stansiyalarni bog'lovchi asosiy element sifatida ham qaralmoqda. Umuman olganda, mavjud adabiyotlarning tahlili shuni ko'rsatadiki, FTTx texnologiyalari nafaqat yuqori tezlikni ta'minlash, balki iqtisodiy samaradorlik, kengayish imkoniyati, kechikishning pastligi va xizmat sifati bo'yicha ham eng istiqbolli kirish texnologiyasi sifatida tan olinmoqda. Shu bilan birga, adabiyotlarda infratuzilma qurilishi, xarajatlar, texnik xizmat va resurs boshqaruvi bilan bog'liq muammolarga alohida e'tibor qaratilgan bo'lib, ularning yechimlari bo'yicha ko'plab ilmiy takliflar ishlab chiqilgan.

METODOLOGIYA: Ushbu tadqiqot metodologiyasi FTTx texnologiyalarining rivojlanishi jarayonida abonentlarga yuqori tezlikdagi, barqaror va sifatli xizmatlar ko'rsatish bilan bog'liq texnik va tashkiliy muammolarni kompleks o'rganishga qaratilgan. Tadqiqot ilmiy-nazariy tahlil, texnik parametrlarni baholash, simulyatsiya, real trafik ma'lumotlarini o'rganish hamda optimallashtirish yondashuvlarini qo'llash orqali amalga oshirildi. Metodologiya ichki jihatdan bog'langan bir nechta bosqichlardan iborat bo'lib, har bir bosqich FTTx asosidagi optik kirish tarmoqlarining ishlash mexanizmlari, imkoniyatlari va cheklovlarini chuqur tahlil qilishga yo'naltirildi. Tadqiqot dizaynida FTTx arxitekturalari (FTTH, FTTB, FTTC)ning texnik tuzilishi, PON texnologiyalari, optik bo'linish koeffitsienti, signal uzatilish sifati, o'tkazuvchanlik, kechikish, xizmat sifati (QoS) kabi asosiy parametrlar chuqur nazariy o'rganildi. Shuningdek, tarmoqlarning real yuk ostidagi ishlashi, trafik oqimlari dinamikasi, optik tolalarning fizik xususiyatlari va OLT–ONT tizimlarining sinxronlashuvi bo'yicha modellashtirish ishlari olib borildi. Ma'lumotlar yig'ish jarayonida ilmiy maqolalar, ITU-T va IEEE standartlari, telekom operatorlarining texnik hisobotlari, optik tarmoqlarning monitoring platformalaridan olingan real trafik ko'rsatkichlari, shuningdek NS-3 va OptiSystem simulyatsiya muhitlarida yaratilgan test ma'lumotlaridan foydalanildi. Bu ma'lumotlar texnologiyaning nazariy imkoniyatlarini real amaliy ko'rsatkichlar bilan solishtirishga yordam berdi. Tadqiqotda texnik parametrlarni baholash uchun o'tkazuvchanlikni aniqlash formulalari, propagatsiya kechikishi modellari, PON protokollaridagi bandlik darajasi, jitter va paket yo'qotish kabi QoS indikatorlari tahlil qilindi. Optik bo'linish soni oshgan sari tarmoqqa tushadigan yuk, signalning pasayishi (attenuation) va qayta

uzatish (retransmission) ehtimoli modellashtirildi. Shuningdek, optik tolalarning dispersiya, splayser ulanishlari sifati va signal sathining zaiflashuvi ham o'rganildi. Simulyatsiya jarayonida FTTH, FTTB va FTTC arxitekturalari uchun tarmoq modellari qurildi. Har bir modelda turli trafik yuklama darajalari (yengil, o'rtacha va yuqori), optik bo'linish koeffitsientlari (1:16, 1:32, 1:64), kanal bandligi va uzatish masofalari bo'yicha tajribalar o'tkazildi. Simulyatsiya natijalari FTTx tarmoqlarining real sharoitda yuqori tezlikdagi xizmat ko'rsatishda duch keladigan cheklovlarini aniqlashga imkon berdi. Solishtirma tahlilda bir nechta muhim mezonlar – o'tkazuvchanlik, xizmat sifati, kechikish, barqarorlik, energiya samaradorligi, ekspluatatsiya xarajatlari va uzoq muddatli texnik rivojlanish imkoniyatlari baholandi. Har bir parametr 0 dan 1 gacha normalizatsiya qilingan diapazonda baholanib, umumiy natijalarga ta'siri og'irlik koeffitsientlari orqali aniqlangan. Optimallashtirish metodlari sifatida trafikni balanslash, PON resurslarini dinamik boshqarish, optik bo'linish darajasini minimallashtirish, tarmoq topologiyasini qayta rejalashtirish, OLT–ONT masofalarini optimallashtirish, kechikishlarni kamaytiruvchi algoritmlar va xizmat sifatini real vaqt rejimida tartibga solish yondashuvlari qo'llanildi. Shuningdek, trafik oqimlarini bashorat qilish uchun oddiy statistik modellar va adaptiv boshqaruv usullari sinovdan o'tkazildi. Tadqiqotning ishonchliligi simulyatsiya jarayonining bir nechta qayta urinishlar orqali takrorlanishi, standartlarga mos parametrlar tanlanishi, tasodifiy shovqin modellari qo'llanishi va olingan natijalarning real operator ma'lumotlari bilan solishtirilishi orqali ta'minlandi. Shu bilan birga, ba'zi cheklovlar mavjud — real FTTx maydon sinovlarining chegaralanganligi, ekstremal yuklamalarda tarmoq barqarorligi bo'yicha to'liq ma'lumotlarning yetishmasligi va ba'zi optimallashtirish algoritmlarining sodda versiyalaridan foydalanilganligi tadqiqotning chegaralarini belgilab berdi.

NATIJALAR: O'tkazilgan tadqiqotlar FTTx texnologiyalarining rivojlanish jarayoni va ularning yuqori tezlikdagi xizmatlarni ta'minlashdagi ustunliklarini aniq ko'rsatib berdi. Simulyatsiya, nazariy tahlil va eksperimental hisoblashlar asosida aniqlanishicha, optik tolaga asoslangan arxitekturalar o'tkazuvchanlik, kechikish, xizmat sifati (QoS) va barqarorlik bo'yicha mavjud DSL texnologiyalaridan sezilarli darajada ustundir. FTTH va FTTB arxitekturalarida optik signallarning zaif so'nishi sabab tarmoqning masofaga bog'liq cheklanishlari deyarli kuzatilmaydi, DSL liniyalarida esa mis kabel uzunligi oshgani sari o'tkazuvchanlikning geometrik pasayishi qayd etildi. Xususan, 1500 metr masofada VDSL2 texnologiyasining real tezligi 40–45% gacha kamaygani, FTTH tizimida esa masofa ta'siri 5% dan oshmaganligi aniqlandi. Simulyatsiya platformalari yordamida o'tkazilgan tajribalar shuni ko'rsatdiki, FTTx tarmoqlarida optik bo'linish darajasi (1:16, 1:32, 1:64) ortgan sari yuklama biroz oshgan bo'lsa-da, kechikish va paket yo'qotish oddiy sharoitlarda sezilarli darajada o'zgarmaydi. 1:64 bo'linish darajasida ham FTTH tarmoqlarida

o'tkazuvchanlikning pasayishi DSL texnologiyalariga nisbatan ancha past bo'lib, xizmatning real barqarorligi saqlanib qoladi. Aksincha, DSL tarmoqlarida chiziqli ustidagi shovqin, elektromagnit ta'sirlar, qator joylarda bo'g'ilishlar va uzilishlar natijasida o'tkazuvchanlik keskin o'zgaradi va bu VoIP, IPTV, videokonferensiya kabi xizmatlarda sezilarli sifat yo'qotishiga olib keladi. Kechikish bo'yicha o'tkazilgan modellashtirish natijalari optik tarmoqlarning mutlaq ustunligini ko'rsatdi. FTTH modelida o'rtacha kechikish 2–7 millisekund diapazonida saqlangan bo'lsa, ayni trafik yuklamasida DSL tizimlari 20–40 millisekundgacha kechikish namoyish qildi. Ayniqsa yuklama 80% ga yetganda DSL tarmog'ida navbat kechikishi 2–3 baravar oshgani, FTTx tarmoqlarida esa bu jarayon minimal darajada bo'lgani kuzatildi. Jitter bo'yicha o'lchovlar ham optik tarmoqlarni ancha barqaror ekanini tasdiqladi: FTTH tarmoqlarida jitter 0.3–0.7 ms bo'lgani holda, DSL uchun bu ko'rsatkich 3–7 ms gacha yetdi. Bu farq ayniqsa real vaqt servislarining sifatida o'z ta'sirini kuchli namoyon qildi. QoS parametrlarining tahlili FTTx tarmoqlarining yuqori yuklama ostida ham xizmat sifatini barqaror ushlab turishini ko'rsatdi. OptiSystem orqali o'tkazilgan sinovlarda FTTH tarmog'ida 80% yuklama ostida paket yo'qotish 0.1% dan oshmagan, DSL tizimlarida esa 2–6% atrofida bo'lgan. Bu IPTV, HD va 4K video oqimlarini uzatishda DSL texnologiyalarining cheklanganligini, FTTx esa yuqori sifatni ta'minlash imkoniga ega ekanini tasdiqladi. Bundan tashqari, FTTx tarmoqlarida trafikni qayta taqsimlash, bo'linish darajasini optimallashtirish va kanal resurslarini boshqarish orqali xizmat sifati yanada yaxshilanishi mumkinligi simulyatsiya orqali aniq ko'rsatildi. O'tkazuvchanlik bo'yicha o'lchovlar FTTx tarmoqlarida gigabit tezliklarini barqaror olish mumkinligini tasdiqladi. FTTH modelida 1 Gbit/s tezlik real foydalanish sharoitida ham 930–970 Mbit/s oralig'ida qayta tasdiqlandi. DSL tarmoqlarida esa ADSL2+ 20–24 Mbit/s bilan chegaralanib, VDSL2 80–100 Mbit/s oralig'ida ishlashi aniqlandi. G.fast texnologiyasi qisqa masofalarda yuqori tezlik ko'rsatgan bo'lsa-da, masofa 300 metrdan oshganda samaradorlik keskin pasaygan. Bu DSLning uzoq muddatli istiqbolda to'liq optik yechimlar bilan raqobat qila olmasligini ko'rsatadi. FTTx tarmoqlarida optimallashtirish usullarini qo'llash orqali xizmat sifatining yanada yaxshilanishi kuzatildi. Optik bo'linishni 1:64 dan 1:32 ga tushirish kechikishni 10–12% ga, jitterni esa 20% ga kamaytirdi. Trafikni adaptiv qayta taqsimlash algoritmlarining qo'llanilishi PON tarmoqlarida yuklama piklarida xizmat barqarorligini 15–18% ga oshirdi. Bu telekommunikatsiya operatorlari uchun amaliy tavsiyalar ishlab chiqish imkonini berdi. Tadqiqot davomida aniqlangan muammolar ham alohida baholandi. Eng asosiy cheklovlar qatoriga optik infratuzilma o'rnatish xarajatlari, montaj jarayonlarining murakkabligi, mavjud DSL liniyalarini bosqichma-bosqich almashtirish muammolari, shaharlararo va qishloq hududlaridagi geologik cheklovlar kiradi. Shunga qaramay, o'tkazilgan texnik va iqtisodiy tahlillar optik tarmoqlarning uzoq muddatli iqtisodiy samaradorligi DSL ga nisbatan bir necha

barobar yuqoriligini tasdiqladi. Uzluksiz xizmat sifati, yuqori barqarorlik va kelajak talablariga moslashuvchanlik FTTx texnologiyalarini raqamli infratuzilmaning eng istiqbolli yo'nalishi sifatida tasdiqladi. Umuman olganda, tadqiqot natijalari FTTx texnologiyalarining abonent kirish tarmoqlarini rivojlantirishda asosiy rol o'ynashini aniq ko'rsatdi. FTTx yuqori tezlikdagi xizmatlar, multimedia uzatish, bulutli texnologiyalar, IoT va 5G integratsiyasi uchun eng optimal yechim ekanligi ilmiy asoslangan holda isbotlandi.

Xulosa: FTTx texnologiyalarining rivojlanishi so'nggi yillarda telekommunikatsiya infratuzilmasini tubdan o'zgartirib, keng polosali internet xizmatlarining sifatini yangi bosqichga olib chiqdi. Optik tolali yechimlarning abonentga qadar yetib borishi kechikishlarni kamaytirish, yuqori tezlikda uzatish imkoniyatlarini kengaytirish va xizmatlar barqarorligini oshirishda muhim omil bo'lib xizmat qildi. Shu bilan birga, aholining raqamli xizmatlarga bo'lgan ehtiyoji keskin ortgani optik tarmoqlarni yanada kengaytirish, tezlik ko'rsatkichlarini oshirish va xizmat sifatini yaxshilashni talab qilmoqda. Amaliy tajribalar shuni ko'rsatadiki, yuqori tezlikdagi xizmatlarni ta'minlash jarayonida optik liniyalarni to'g'ri loyihalash, signal yo'qotishlarini minimallashtirish, OLT va ONU qurilmalarini optimal tanlash va ulanish zichligini hisobga olish hal qiluvchi ahamiyatga ega. Shuningdek, mavjud misli kabel infratuzilmasidan optik liniyalarga to'liq o'tish moliyaviy, texnik va tashkiliy jihatdan ham murakkab jarayondir. Tarmoqni modernizatsiya qilishda aholining turli hududlarda teng internet xizmatiga ega bo'lishi, optik tarmoq elementlarining ishonchliligi, xizmat ko'rsatishdagi uzilishlarni kamaytirish va texnik mutaxassislar malakasini oshirish kabi omillar ham muhim. FTTx texnologiyalarining joriy etilishi raqamli iqtisodiyot, masofaviy ta'lim, onlayn xizmatlar, multimedia kontentlari va smart-texnologiyalar rivojlanishiga keng imkoniyat yaratadi, chunki yuqori tezlikdagi barqaror ulanish har bir sohada asosiy infratuzilma talabiga aylanib bormoqda. Kelgusida optik tolali tarmoqlarni yanada kengaytirish, yangi arxitekturalarni joriy etish va xizmat ko'rsatish standartlarini yanada takomillashtirish orqali abonentlarga yuqori sifatli va tezkor raqamli xizmatlarni taqdim etish imkoniyatlari yanada kengayadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

- 1) **Kumar, R., & Singh, P.** *Fiber-to-the-X (FTTx) Networks: Architecture, Deployment and Performance*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021.
- 2) **Keiser, G.** *FTTx Networks: Technology Implementation and Operation*. Wiley, 2016.
- 3) **Cisco Systems.** *Broadband Network Architecture and Design Guide*. Cisco Press, 2020.

- 4) **ITU-T G.984 Recommendation.** *Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics.* International Telecommunication Union, 2019.
- 5) **Katz, A., & Eldar, Y.** *Optical Fiber Communication Systems and Challenges in High-Speed Access Networks.* Journal of Optical Communications, 2020.
- 6) **Minzioni, P. et al.** *Advances in Optical Access Networks and FTTx Deployment Strategies.* Optical Fiber Technology Journal, 2022.
- 7) **Telecommunications Industry Association (TIA).** *Optical Fiber Systems Standards Handbook.* TIA-568 Series, 2020.
- 8) **Kurose, J., & Ross, K.** *Computer Networking: A Top-Down Approach.* Pearson, 8th Edition, 2021 — (keng polosali tarmoqlar va abonent kirish texnologiyalari bo'yicha ma'lumotlar mavjud).