ВСТУП

Розвиток інформаційного суспільства супроводжується швидким зростанням значення інфокомунікаційних технологій у житті людини, функціонуванні суспільства та діяльності держави. Сучасні телекомунікаційні мережі вирізняються передусім тенденцією до об'єднання мобільних і фіксованих систем зв'язку. Процес інтелектуалізації мереж базується на основній концепції розмежування функцій комутації та надання послуг, що, у свою чергу, створює передумови для формування глобальної інформаційної інфраструктури (ГІІ). Основна задача всієї галузі телекомунікацій – це надання будь-якому абоненту будь-якої послуги в будь-якому місці в будь-який час за прийнятну оплату. Ця мета знайшла своє втілення в концепції глобальної інформаційної інфраструктури.

Розвитку глобальної інформаційної інфраструктури (ГІІ) сприяють кілька ключових чинників: поєднання технологій телекомунікацій, комп'ютеризації та побутової електроніки; активне впровадження цифрових рішень постачальниками послуг; а також нові можливості для бізнесу, що з'явилися внаслідок лібералізації телекомунікаційного ринку. Для практичного втілення концепції глобальної інформаційної інфраструктури (ГІІ) необхідно створити ефективну систему передавання даних, організувати їх розподілену обробку та зберігання, забезпечити надання класичних комунікаційних сервісів, а також підтримку допоміжного програмного забезпечення й термінального обладнання.

Найбільш придатною основою для розгортання ГІІ є платформа NGN (тобто мережа наступного покоління). В архітектурі NGN знайшли своє продовження найбільш ефективні рішення інтелектуальної мережі. Водночас варто підкреслити, що в умовах швидкого розвитку та взаємного зближення телекомунікаційних і інформаційних технологій, різноманіття типів і структури мереж, а також постійного зростання попиту користувачів на нові послуги й підвищення вимог до їх якості, на ринку зв'язку постають дедалі складніші завдання. За таких обставин особливого значення набуває визначення та наукове опрацювання комплексу актуальних проблем, пов'язаних із розвитком галузі.та задач пов'язаних з управлінням сучасними мобільними та стаціонарними телекомунікаційними мережами.

Щоб забезпечити такі вимоги висунуті в рамках концепції NGN та ГІІ необхідна більш гнучка архітектура управління, здатна оперативно реагувати на зміни, швидко впроваджувати нові послуги та забезпечувати їх стабільну підтримку в межах глобальної мережі.

Система управління телекомунікаційними мережами нового покоління характеризується значними масштабами, високим рівнем складності, широкими функціональними можливостями та конкурентоспроможністю. Вона повинна відповідати жорстким вимогам щодо захисту інформації, забезпечувати високу надійність, точність роботи й можливість розподіленого функціонування на великій території.

Управлінська система NGN (Next Generation Network) має являти собою комплекс рішень, що забезпечує координацію мереж, побудованих на основі різних технологій — фіксованого та мобільного зв'язку, мереж передавання даних, сигналізації тощо. Вона повинна підтримувати широкий спектр послуг, незалежно від виробника обладнання, на якому вони реалізуються.

Згідно з прогнозами, обсяг керуючої інформації в таких системах зростатиме разом із розширенням переліку послуг і підвищенням їх складності. Це може призвести до того, що система управління стане надмірно навантаженою й фактично «поглине» основну мережу. Тому одним із ключових завдань під час проєктування систем управління мережами NGN є визначення мінімального обсягу керуючих даних, який забезпечує необхідну точність контролю параметрів мережі, водночас зводячи до мінімуму надлишкову інформацію. Що і обумовлює актуальність даної магістерської роботи.

Метою магістерської роботи є розробка методики для визначення необхідної кількості управляючої інформації з урахуванням взаємозалежності контрольованих параметрів телекоммунікаційної мережі.

Об'єктом дослідження виступає сучасна конвергентна телекомунікаційна мережа, побудована на основі концепції FMC, що передбачає інтеграцію фіксованих і мобільних технологій зв'язку, а предметом дослідження – параметри системи управління мережі наступного покоління.

Для досягнення поставленої мети здійснено системний аналіз принципів проєктування конвергентних мереж та визначено ключові напрями оптимізації параметрів систем їх управління.

У межах дослідження вирішувалися такі основні завдання:

- аналіз концепції формування та розвитку мереж NGN;
- виявлення чинників, що впливають на ефективність управління конвергентними мережами;
- узагальнення методичних підходів до оцінювання параметрів систем управління.

Під час виконання магістерської роботи застосовано такі методи дослідження:

- метод системного аналізу, який дозволив визначити основні тенденції розвитку конвергентних телекомунікаційних мереж і засобів їх управління;
- порівняльний аналіз, що дав можливість оцінити переваги та недоліки різних архітектур управління;
- аналітичне моделювання, використане для уточнення взаємозв'язків між параметрами мережі та її ефективністю.
- теорії інформації, яка використана для розробки методики розрахунку кількості управляючої інформації.

1 ОНОВНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ МЕРЕЖІ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Конвергентні мережі на основі платформи NGN

Основним завданням сучасної телекомунікаційної галузі є забезпечення можливості для кожного користувача отримувати будь-які необхідні послуги зв’язку у зручному місці та в будь-який час, за доступною вартістю. Ця мета знайшла своє втілення в концепції глобальної інформаційної інфраструктури. Найбільш адекватною платформою для створення ГІІ є мережа наступного покоління (Next Generation Network, NGN). NGN являє собою певну структуру, яка включає в себе всі види існуючих мереж та забезпечує їх взаємодію. Основними характерними рисами такої структури є:

- розділення функцій комутації та послуг;
- використання методу комутації пакетів;
- та можливість доступу до бази даних NGN абонентів будь-якої з існуючих телекомунікаційних мереж.

Архітектура NGN стала розвитком найбільш ефективних рішень інтелектуальної мережі. Мережа NGN відрізняється від інтелектуальної перш за все тим, що її концепція передбачає конвергенцію мобільних та фіксованих мереж, тобто процес відомий під назвою FMC (Fixed-Mobile Cofivergence).

Основним змістом переходу від сучасних мереж до мереж NGN є формування єдиного середовища та інфраструктури, що базуються на перспективних технологіях і програмно-технічних засобах, для надання користувачам нових послуг. Це також передбачає подальшу підтримку існуючих послуг, які з часом повинні бути інтегровані в мережі мобільних та фіксованих операторів.

Згідно з визначенням Міжнародного союзу електрозв'язку, мережа наступного покоління (NGN) повинна забезпечувати пакетну передачу даних, бути придатною для надання телекомунікаційних послуг та підтримувати кілька широкосмугових технологій транспортування з гарантованою якістю обслуговування (QoS). При цьому функції, що стосуються обслуговування, мають бути незалежними від технологій, що здійснюють транспортування. Одним з ключових аспектів є підтримка універсальної мобільності, що забезпечує доступність послуг для користувачів у будь-якому місці та в будь-який час. Концепція мереж наступного покоління тісно пов'язана з терміном «конвергенція», що вказує на розвиток раніше окремих мереж у напрямку створення єдиної платформи для надання послуг і програмного забезпечення. Раніше термін «конвергенція» використовувався для позначення інтеграції інформатизації і зв'язку, а сьогодні в контексті мереж наступного покоління, як правило, застосовується поняття FMC (Fixed-Mobile Convergence). За визначенням Міжнародного союзу електрозв'язку, FMC передбачає надання послуг користувачам через мережу, яка забезпечує гнучку конфігурацію доступу незалежно від того, чи використовуються мобільні чи фіксовані технології.

Проте, в документах МСЕ конвергенцію починають розглядати як поняття більше широке, ніж FMC (дослівно: "not only FMC").

Розумно виділити три основні рівні конвергенції:

- Конвергенція мереж
- Конвергенція послуг
- Конвергенція на рівні програмного забезпечення.

Конвергенція мереж означає, що при побудові конвергентної мережі повинно бути максимально використане конвергентне обладнання (конвергентні термінали, Softswich який керує доменом мобільної та фіксованої мереж). Що є оптимальним рішення з економічної точки зору.

Конвергенція послуг дозволяє абоненту будь-якої з об'єднаних мереж користуватися єдиною базою послуг .

Конвергенція на рівні прикладного забезпечення дозволяє абоненту будь-якої з наявних мереж отримати доступ до всього спектру послуг завдяки певному інтерфейсу. В ролі такого інтерфейсу виступає Інтернет, а конвергентним прикладним забезпеченням є браузери, які ми всі використовуємо на своїх ПК, смартфонах чи КПК.

Фактично конвергентна мережа і забезпечує виконання вимог до послуг сформульованих в концепції ГІ.

Об'єднуючи ці три аспекти, можна визначити FMC як конвергенцію послуг — процес, при якому одна і та сама послуга або додаток можуть використовуватись як на мобільному, так і на фіксованому терміналі, забезпечуючи при цьому можливість безперервного переходу між ними. Яскравим прикладом такої послуг є об'єднання фіксованого IP-TB і мобільного TB. Користувач може, почавши дивитися фільм у себе будинку, на великому телевізорі, перемкнутися потім на мобільний пристрій і продовжити його перегляд уже в дорозі. Але, природно, для забезпечення використається уже конвергенція на рівні мереж.

У числі обов'язкових рис конвергенції слід назвати одночасний обмін інформацією різних видів (голос та відео) і можливість роботи в різних мережах з одного абонентського термінала.

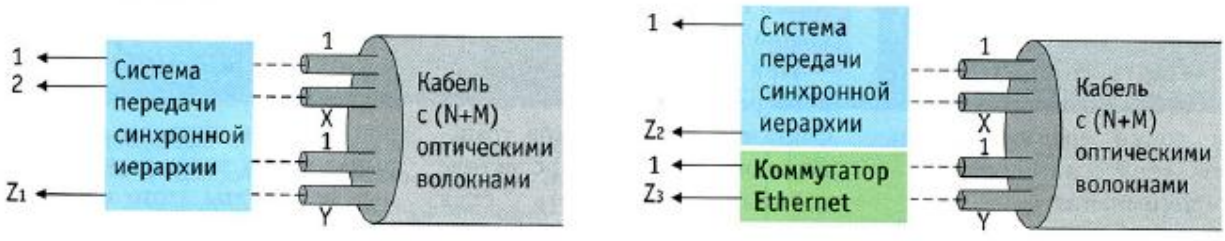
Згідно з рекомендацією Q.1702, конвергентні послуги (converged services) визначаються як інтеграція таких технологій, як Інтернет, мультимедіа, електронна пошта, оперативне пересилання повідомлень, мобільна комерція та інші, в поєднанні з обслуговуванням голосового трафіку.

Для аналізу основних тенденцій телекомунікаційної системи важливі обидва типи процесів - конвергенція й інтеграція. Варто згадати ще один процес, цікавий і важливий з погляду розвитку електрозв'язку. Мова йде про консолідацію . Термін "консолідація" корисний для опису різних варіантів розумного використання загальних апаратно-програмних засобів і лінійно-кабельних споруд. Процеси консолідації, які характерні для сучасної телекомунікаційної системи, можуть розглядатися з технічної, економічної і організаційної точок зору.

Ціль більшості інтеграційних процесів полягає в скороченні капітальних витрат і/або експлуатаційних витрат оператора зв'язку. Крім того, побудова інтегральних мереж і систем часто знижує ризики, які неминуче виникають в операторської діяльності.

Основна ідея NGN – це створення однієї мережі для обслуговування всіх видів трафіку. Прийнято вважати, що капітальні витрати на одну мультисервісну мережу будуть менші, ніж інвестиції на створення декількох мереж, кожна з яких підтримує обмежений набір послуг. За умови, що мережі, які надають такий «обмежений набір послуг» уже створені, гіпотеза про економії капітальних витрат може виявитися помилковою. У той же час, відповідні оцінки показують, що скорочення витрат оператора при побудові NGN може стати досить істотним.

Характерний приклад процесу консолідації – організація транспортних ресурсів для різних технологій комутації. На рис. 1.1 показані два варіанти рішень такого завдання. У лівій частині малюнка представлений варіант побудови транспортної мережі, заснований на інтеграції. Рішення того ж завдання, що базується на консолідації, зображено на правому фрагменті розглянутої моделі.



а) Інтегральне рішення б) Консолідоване

Рисунок 1.1 – Варіанти побудови транспортної мережі

Інтегральне рішення засноване на тому, що в кабелі всі оптичні волокна ущільнюються за допомогою систем передачі синхронної ієрархії. У результаті можуть бути створені транспортні ресурси, обсяг яких можна оцінити кількістю трактів Е1 , що мають пропускну здатність 2048 кбит/с. Можна стверджувати, що питома вартість транспортних ресурсів буде мінімальна в порівнянні з будь-яким іншим варіантом організації мережі, який також орієнтований на створення трактів Е1. При виборі консолідованого рішення враховується той факт, що частина ресурсів транспортної мережі в перспективі повинна підтримувати стик Ethernet. Тоді системи передачі синхронної ієрархії використовуються для ущільнення *X* оптичних волокон. В комутатор Ethernet включаються *Y* оптичних волокон. Для трактів Е1, питома вартість транспортних ресурсів буде вище. Цей недолік компенсується зниженням ризику, викликаного тим, що реалізація стиків Ethernet спрощується в порівнянні з варіантом, заснованому на інтегральному рішенні.

Консолідація в розглянутому прикладі має передбачає використання одного кабелю з оптичними волокнами, які ущільнюються різними системами передачі, що різняться технологією переносу інформації.

Поняття FMC дозволяє проаналізувати основні напрямки розвитку телекомунікаційної системи як процесів конвергенції, інтеграції й консолідації. Для такого аналізу доцільно, насамперед, звернутися до схеми, що дозволяє усвідомити «взаємовідносини» мереж фіксованого і мобільного зв'язку. Ця схема представлена на рис 1.2 Вона заснована на моделі ITU, запропонованої в рекомендаціях серії Y для опису телекомунікаційної мережі універсального призначення.

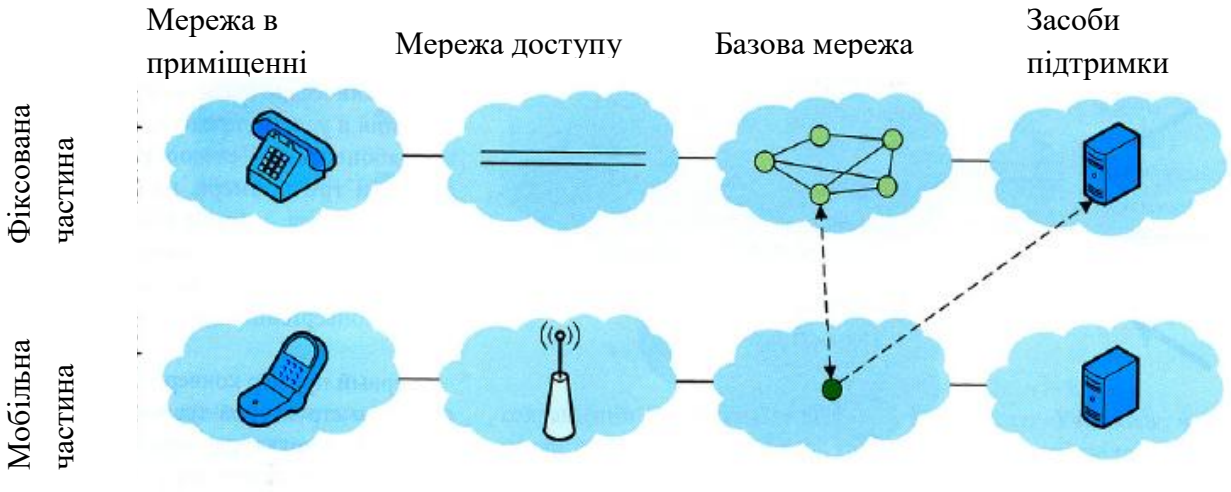


Рисунок 1.2 – Моделі мереж фіксованого й мобільного зв'язку

Як приклади устаткування, що розміщається в приміщенні користувача, показано стаціонарні й мобільний телефонні апарати. Мережа доступу для організації фіксованого телефонного зв'язку являє собою сукупність двухпровідних фізичних ланцюгів. Функції мережі доступу для мобільного зв'язку виконують базові станції й контролери . Базова мережа в обох випадках містить комутаційні станції. Засоби підтримки послуг для будь-яких видів зв'язку можуть бути представлені як сервери.

Якщо абстрагуватися від специфіки використовуваних технічних засобів, то основне розходження між системами фіксованого й мобільного зв'язку полягає в елементі моделі за назвою «базова мережа». Для фіксованого зв'язку базова мережа створювалася як сукупність міжнародних, міжміських і місцевих комутаційних станцій. Вони забезпечують встановлення з'єднань у межах всесвітньої телефонної мережі загального користування (ТмЗК). Ці комутаційні станції, як правило, здатні обслуговувати трафік, створюваний абонентами мобільного зв'язку.

З урахуванням цих обставин систему мобільного зв'язку доцільно розглядати як частина ТмЗК, основна особливість якої полягає в забезпеченні мобільності термінала. Таке трактування пояснює написи, зроблені в лівій частині кожної моделі.

Еволюція телекомунікаційних систем закономірно веде до впровадження концепції FMC (конвергенції фіксованого та мобільного зв’язку). Реалізація FMC передбачає не лише трансформацію технічної архітектури мережі, а й адаптацію бізнес-моделей операторів зв'язку, а також переосмислення підходів до надання телекомунікаційних послуг. У результаті формується новий тип інфокомунікаційної інфраструктури, яка ґрунтується на таких ключових принципах [5]:

- забезпечення безшовної взаємодії на рівні архітектур, комутаційного обладнання та сервісів;
- адаптивність механізмів доступу користувачів до мережевих ресурсів;
- розповсюдження абонентських пристроїв з підтримкою конвергентного доступу;

- персоніфікація сервісів, зокрема можливість налаштування послуг у як мобільних, так і у фіксованих мережах;
- надання послуг у найбільш ефективній та зручній для користувача формі, з урахуванням конкретних умов споживання.

Окрім технологічного виміру, FMC відображає фундаментальні закономірності розвитку ринку, де домінують великі гравці, здатні розширювати спектр своїх сервісів і нарощувати обсяги їх надання. У відповідь на зміну ринкової динаміки, оператори телекомунікацій змушені диверсифікувати свої послуги, включаючи ті, що раніше вважалися несумісними з їхньою основною діяльністю. Такий підхід дозволяє краще відповідати на зростаючі очікування споживачів, які обирають провайдерів з найбільш комплексними та гнучкими пропозиціями.

У результаті оператори конвергентних мереж, за рахунок розширення спектра послуг і збільшення доходу, отримують значні переваги у питаннях ціноутворення. Мобільні оператори, у свою чергу, можуть оптимізувати трафік, пропонувати нові сервіси з доданою вартістю, знижувати навантаження на інфраструктуру та зміцнювати лояльність абонентів. Провайдери фіксованого зв'язку отримують можливість залучати нових користувачів, підвищувати рівень задоволеності існуючих клієнтів та впроваджувати інноваційні послуги з вищим рівнем якості.

З точки зору вигоди для користувача, FMC дозволить зробити одержання послуг зручнішим внаслідок зниження їхньої вартості, введення єдиного рахунку, одного терміналу й т.п. Розробка конвергентних терміналів забезпечить можливість донести послуги до кінцевого користувача. Збільшення кількості мереж Wi-Fi та інших бездротових мереж дозволить здешевити підтримуючі їх термінали та надавати на їх базі масові послуги.

Тому цілком ймовірне прогнозоване багатьма дослідниками перенесення конкурентної боротьби між операторами «всередину» абонентського терміналу.

Користувач такого мультисервісного терміналу зможе вибрати спосіб отримання послуги, керуючись її зручністю, якістю, вартістю. Подібні термінали вже давно розроблені і навіть використовуються в деяких сучасних мережах. Так, у 2006 р. компанія Brasil Telecom (разом з Motorola) представили на ринку пристрій Telefone Unico, який здатний поєднувати як мобільний телефон, так і стаціонарний одночасно.

1.2 Архітектура IMS

Сьогодні вже можна бути впевненим, що FMC буде базуватися на протоколі IP. Не настільки очевидною, але перспективною основою для розвитку FMC є концепція IP Multimedia Subsystem (IMS). Саме рух у напрямі IMS вважається найімовірнішим сценарієм як для телекомунікаційних операторів і провайдерів послуг зв’язку, так і для компаній, що виготовляють обладнання та програмні рішення.

IMS представляє собою нову модель архітектури мережі, центральним елементом якої є пакетна транспортна інфраструктура, здатна підтримувати будь-які технології доступу та забезпечувати функціонування широкого спектра інфокомунікаційних сервісів. Концепція була розроблена консорціумом 3rd

Generation Partnership Project (3GPP) у 2002 році для мереж 3G/WCDMA та закріплена в стандарті 3GPP R.5. Надалі цю архітектурну модель адаптували й інші організації: 3GPP2 для cdma2000, ETSI, TISPAN для фіксованих мереж, а також OMA та IETF, які визначили прикладні сервіси й мережеві протоколи відповідно. Форум MSF та альянс ATIS підтримали IMS як основу для мереж наступного покоління (NGN).

Протягом останніх років IMS активно просувається як індустріальними об'єднаннями, так і виробниками обладнання, розглядаючись як ключ до розв'язання низки проблем сучасних телекомунікацій. Ця відкрита стандартизована NGN-архітектура об'єднує голосовий та передавання даних у єдиній пакетній мережі, забезпечуючи відокремлення керування викликами від голосового трафіку, а також підтримку роумінгу між мобільними та фіксованими мережами. Передбачається, що як універсальна технологічна основа IMS сприятиме конвергенції різних мережевих середовищ, розвитку прикладних сервісів, впровадженню нових послуг і скороченню операційних витрат завдяки використанню відкритих стандартів.

IMS визначає стандартну архітектуру для надання мультимедійних і голосових послуг (VoIP), що базується на варіації протоколу SIP, розробленій 3GPP. Транспортна інфраструктура IMS передбачає застосування IP/MPLS або будь-якої IP-мережі. Головна ідея полягає у створенні єдиного середовища для NGN-операторів з підтримкою розширених механізмів керування та надання IP-послуг мобільними операторами. У версії IMS (3GPP R.5) реалізована підтримка мереж GSM/GPRS (2G) і WCDMA/UMTS (3G), тоді як специфікації 3GPP2 розширили цю модель WLAN і cdma2000, забезпечивши мультимедійні сервіси реального часу (MMD). Подальші редакції (R.6–R.8) були спрямовані на інтеграцію мобільних і фіксованих мереж у межах концепції Fixed Mobile Convergence (FMC).

Фактично IMS з'явилася як результат розвитку UMTS, коли до архітектури мереж 3G було додано рівень керування мультимедійними сесіями на основі SIP. Серед ключових характеристик IMS можна виокремити:

- багаторівневу структуру, яка чітко відокремлює транспортний, керуючий та прикладний рівні;
- незалежність від середовища доступу, що дозволяє реалізувати конвергенцію мобільних і фіксованих мереж;
- підтримку мультимедійного обміну в реальному часі як між користувачами, так і між користувачами та системами (наприклад, у мережевих іграх);
- інтеграцію сервісів реального та відкладеного часу, включно зі стримінговими додатками та чатами;
- можливість комбінування кількох сервісів у межах однієї сесії та організацію паралельних синхронізованих сесій.

Серед переваг IMS — підтримка інтерфейсів Parlay, CAMEL та INAP, що дозволяють адаптувати послуги для різних терміналів незалежно від типу мережі або особливостей роумінгу. Завдяки Parlay API, розробленим спільно Parlay Forum,

3GPP та ETSI, спрощується розробка прикладних серверів без необхідності глибокого знання протоколів SIP, ОКС №7 чи ISDN.

Згідно зі стандартами 3GPP, IMS є горизонтальною багаторівневою архітектурою, яка охоплює рівні послуг, керування та взаємодії. Модель спрямована на підтримку мультимедійних сервісів у реальному часі (голос, відеозв'язок), їх інтеграцію з асинхронними додатками та створення комбінованих послуг. Нові версії IMS орієнтуються на використання опорних мереж з IPv6, з можливістю взаємодії з IPv4 і мережами комутації каналів.

У системі IMS транспортний рівень є незалежним від рівня доступу: підключення може здійснюватися через фіксовані (телефонні, xDSL, оптичні, Ethernet), мобільні (GSM/GPRS/EDGE, 3G/WCDMA, cdma2000) або бездротові (WLAN, WiMAX тощо) мережі. Завдяки цьому забезпечується повноцінний роумінг і безперервність сесій при зміні точки доступу. Протокол SIP виступає універсальним засобом керування сесіями та сервісами, перетворюючи IMS на комплексну платформу комунікацій в IP-мережах.

До базових вимог архітектури IMS належать:

- поєднання голосових сервісів з іншими послугами реального часу;
- сумісність з традиційними телефонними мережами та IN-сервісами;
- застосування стандартизованих механізмів обміну даними для білінгу й автентифікації;
- підтримка конвергенції провідних і бездротових мереж через відкриті інтерфейси API.

Сьогодні IMS розглядається операторами, сервіс-провайдерами та виробниками обладнання як одна з ключових технологій для побудови NGN і конвергенції мобільних та стаціонарних мереж на основі IP. Принцип, що лежить в основі цієї концепції, полягає у незалежності доставки послуг від конкретної інфраструктури, що реалізується завдяки багаторівневому підходу. Це відкриває можливості для залучення до мереж сторонніх постачальників сервісів та створення універсального механізму надання послуг, незалежно від технології доступу.

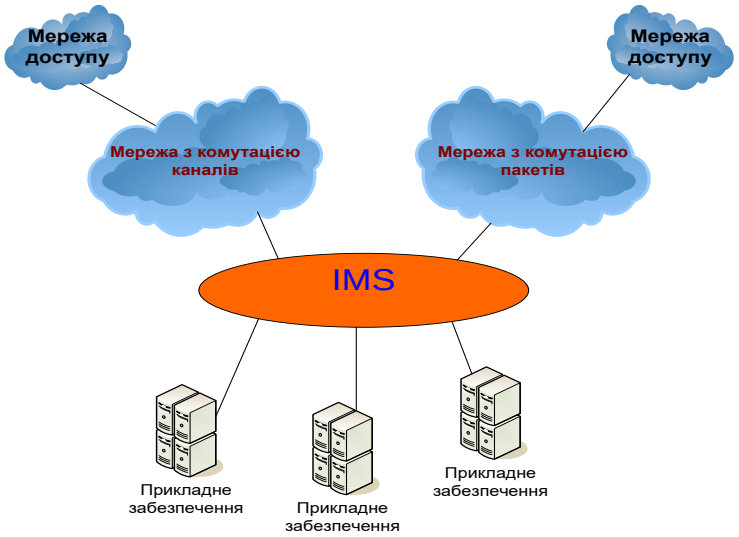


Рисунок 1.3 – Структкра система IMS

IMS може стати основою для FMC завдяки декільком принципам, на основі яких вона створювалася в 3GPP. Так, в мобільних мережах 2,5G присутні два домени - комутації каналів і комутації пакетів. Підсистема IMS створювалась як певний рівень мережі, що буде керувати наданням IP-орієнтованих послуг в обох доменах.

Щоб зробити це можливим, IMS повинна бути незалежною від середовища, через яке надається послуга. Відповідно, саме на рівні IMS може відбуватися об'єднання мереж, побудованих за різними технологіями.

Система IMS функціонує в режимі комутації пакетів, і основним протоколом сигналізації є SIP. Основу вузла IMS складають три блоки – один контроллер і дві бази даних, а саме (рис.1.4):

- менеджер виклику CSCF (Call Session Control Function) -це аналог SSP в інтелектуальній мережі IN;
- абонентська база даних HSS (Home Subscriber System) -аналог HLR в мережі GSM;
- медіасервер (MRF - Media Resource Function) - аналог інтелектуальної периферії в IN.

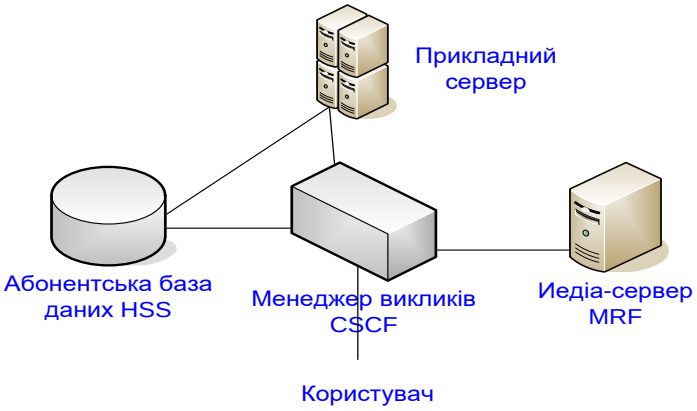


Рисунок 1.4 – Структура вузла IMS

Над вузлом IMS знаходиться прикладний сервер. Він містить логіку послуг і за повідомленнями з IMS про тригерні події повертає в IMS команди: що робити з черговим викликом. Менеджер виклику CSCF організовує сеанс зв'язку: взаємодіє з абонентською базою HSS для забезпечення мобільності, взаємодіє з сервером AAA (Access, Authorization, Accounting) і т.д.

Наявність у структурі IMS таких компонентів, як база даних абонентів Home Subscriber Server (HSS), яка зберігає не лише дані користувачів, а й відомості про термінальне обладнання, а також контролери медіашлюзів Media Gateway Control Function (MGCF), забезпечує гнучку адаптацію сервісів під різні користувацькі пристрої та сприяє наданню уніфікованих послуг. HSS, що виконує функції, аналогічні реєстру HLR у стільникових мережах, містить інформацію про абонентів як мобільного, так і фіксованого сегментів. Функціонал керування викликами та

сеансами (Call Session Control Function, CSCF) розподілений між кількома спеціалізованими серверами, кожен з яких відповідає за окремі етапи обробки викликів і сигналізації.

IMS виконує роль єдиної технологічної платформи, яка об'єднує Інтернет, традиційні телефонні мережі (ТФОП) та бездротові системи доступу. Вона формується як міжнародний стандарт, що регламентує механізми взаємодії та роумінгу мультимедійних послуг в IP-середовищі. Підтримку IMS надають провідні виробники телекомунікаційного обладнання, зокрема Alcatel, Ericsson, Huawei, Lucent Technologies, Motorola, NEC, Nokia, Nortel, Siemens та низка інших компаній. Багато операторів уже продемонстрували готовність до впровадження IMS, і рішення на її базі реалізуються у практичних проєктах British Telecom, Cingular Wireless, KPN, Shandong Unicom, Sprint, Telecom Italia Mobile, TeliaSonera тощо.

Сьогодні IMS розглядається як ключовий компонент архітектури мереж майбутнього, що визначає подальший напрям розвитку галузі телекомунікацій. Якщо нинішній етап розвитку NGN характеризується впровадженням мультимедійних пристроїв і сервісів, то наступною фазою стане перехід від традиційних голосових послуг до інтегрованих мультимедійних сервісів, які поєднують передавання голосу та даних. З технологічного боку це означатиме перехід до уніфікованої конвергентної мережі з простою архітектурою, де послуги надаватимуться на спільній технологічній основі незалежно від типу мережі доступу.

На відміну від поточних NGN, які часто страждають від недостатньої взаємодії між різними системами передачі інформації — як на інфраструктурному, так і на програмному та користувацькому рівнях, — IMS покликана усунути ці бар'єри. Вона забезпечує узгоджену роботу різних технологій та типів доступу, роблячи взаємодію абонента з мережею максимально прозорою та універсальною.

Поки IMS архітектура розвивалася тільки в 3GPP, у ній були присутні процедури й елементи, що відносилися до технологій мобільних мереж. Але в 2005 р. до розробки IMS приєднався проект TISPAN інституту ETSI і уніфікував IMS, випустив власний набір стандартів ETSI TISPAN Release l, який сприяв виходу 3GPP IMS Release 7. В стандартах, запропонованих ETSI, пророблюються аспекти, які дозволяють користувачам фіксованих мереж отримувати доступ до послуг IMS. До них відносяться аутентифікація, біллінг, безпека, підтримка традиційних терміналів та ін.

Головною причиною сьогоднішніх процесів конвергенції й переходу до мереж зв'язку наступного покоління NGN є розуміння того, що мовне з'єднання - лише один з численних і найбільш використовуваних телекомунікаційних сервісів: починаючи з доступу в Інтернет і продовжуючи довгий перелік послуг Instant Messaging, Presence, Video Sharing, Push to Talk, Gaming і ін.

Інтереси операторів мобільного й фіксованого зв'язку співпадають вже сьогодні. Так, першою послугою, яка стала надаватися операторами цих мереж, став доступ через Wi-Fi. Така ж ситуація очікується на ринках WiMAX і побудови різноманітних бездротових локальних мереж.

Але надання подібних послуг - це ще не FMC, а от технологію, що базується на

технологіях бездротового доступу, а саме VCC - дворежимного хендовера VCC (Voice Call Continuity), що використовується для досягнення безперервності мовного з'єднання при переході абонента з фіксованої мережі в мобільну й навпаки - можна вважати значним кроком до FMC. Так перша комерційна експлуатація даної послуги на базі IMS була реалізована в Китаї в кінці 2006 р. Huawei Technologies. Її користувачі можуть переміщуватись між Wi-Fi/WiMAX мережами і мережами GSM/CDMA/UMTS.

Однією з найбільш використовуваних послуг конвергентної мережі на початковому етапі впровадження є технологія дворежимного хендовера VCC (Voice Call Continuity). Специфікація цієї послуги з'явилась в сьомому релізі IMS. Для її реалізації 3GPP впровадив спеціальний сервер додатку VCC (названий HOAS - Handover Application Server), який підключається до мережі IMS за протоколом SIP. Завдяки цьому досягається безперервність телефонної розмови (підтримка сесії в активному стані) при зміні абонентом доменів доступу, тобто при перемиканні між доменами комутації каналів CS (Circuit Switched) та IMS. Для цього передбачаються наступні функції :

• Domain Selection Function (DSF), що відповідає за вибір домену відповідно до політики оператора або переваги абонента (політика оператора має вищий пріоритет відносно переваги абонента); задає реєстраційні статуси IMS і CS для забезпечення вибору домену; взаємодіє з DTF для визначення домену, використовуваного активними з'єднаннями термінала, щоб застосувати це при виборі домену для вхідних дзвінків; надає номер CSRN (CS Domain Routing Number) для напрямку виклику з Domain Selection Function (DSF), що знаходиться в домені CS;

• Domain Transfer Function (DTF) - реалізує запит від терміналу абонента на перемикання доступу між доменом CS і IMS; підключається до S-CSCF (Serving Call Session Control Function) по інтерфейсу ISC (IP multimedia Subsystem Service Control Interface); зберігає інформацію про поточний домен, що використовується активною сесією абонента для її використання при виборі наступного домену, а також інформацію, необхідну для доставки Calling Domain Transfer Function (DTF) на термінал абонента в той час, коли мовна сесія закріплена за IMS; організує 3rd Party Call Control (Spec) після закінчення установки з'єднання для того, щоб зробити можливим перехід між доменом CS і IMS; підготовлює дані про процедуру переходу між доменами для нарахування оплати;

• CS Adaptation Function (CSAF) виконує роль проксі-терміналу в IMS для викликів, що надійшли з домену CS; ідентифікує абонента VCC в домені IMS для встановлення з'єднання з CS; передає дані, що відносяться до з'єднання, з домену CS у домен IMS; керує динамічним номером IMRN, що вказує на IMS-домен; виконує роль SIP-терміналу стосовно IMS для викликів з домену CS;

• CAMEL Service, що реалізує політику переадресації (redirection policy) CS; допомагає у присвоєнні й вилученні номерів IMRN при встановленні з'єднання з доменом CS; виконує пересилання даних про виклик з домену CS в домен IMS, переадресацію дзвінків з домену CS в IMS з допомогою IMRN, облік PSI-серверів додатків VCC на основі стандартних телефонних номерів, названих VDN (VCC Domain Transfer Number).

Все вищесказане справедливе і для наступного покоління VCC - послуги SCC (Session Call Continuity), що забезпечує абонентові безперервність не тільки мовного з'єднання в кожній мережі, але й надання будь-яких мультимедійних послуг на будь-який використовуваний ним термінал. Варто зазначити, що конвергентні послуги SCC використовуються також і при зміні терміналу.

Початкові вкладення у впровадження IMS очікується компенсувати за рахунок досягнення низки стратегічних переваг, серед яких — швидке розгортання нових сервісів і підвищення ефективності експлуатації мережі. Водночас точна оцінка економічного ефекту від переходу на IMS та витрат, пов’язаних з модернізацією інфраструктури під цю архітектуру, залишається доволі складним завданням. За оцінками Bell Labs, застосування IMS протягом п’ятирічного періоду дає змогу знизити операційні витрати на надання голосових та інформаційних послуг приблизно на 10 %. Серед найбільш перспективних сфер використання технології — Push-to-Talk over Cellular (PoC), VoIP, а також сервіси відеообміну та миттєвих повідомлень у режимі реального часу.

1.3 Архітектура Softswich

Архітектура програмного (гнучкого) комутатора (softswitch) із самого початку створювалася в структурах, далеких від офіційних міжнародних організацій традиційної телефонії. Перші спроби відійти від жорсткої архітектури традиційної телефонії були пов’язані з діяльністю Міжнародного консорціуму з програмних комутаторів ISC (International Softswitch Consortium), який згодом отримав назву IPCC (International Packet Communication Consortium). Основною метою цієї організації стало просування стандартів програмних комутаторів і забезпечення взаємодії між різними реалізаціями таких технологій. У межах IPCC діяли спеціалізовані робочі групи, які займалися питаннями архітектури, протоколів, сервісів та маркетингових аспектів softswitch-рішень.

Традиційні комутатори зазвичай являють собою «монолітні» системи, що використовують закриті протоколи для внутрішньої взаємодії підсистем. У мережах нового покоління ці обмеження долаються завдяки застосуванню програмних комутаторів (softswitch), які відкривають інтерфейси та протоколи, забезпечуючи більшу гнучкість. Розподілена архітектура NGN дає змогу операторам формувати мережеву інфраструктуру з найкращих рішень різних постачальників. У результаті створюється мультивендорне середовище з розширеною функціональністю та нижчими витратами.

Варто зазначити, що softswitch — це не просто один із мережевих пристроїв, а повноцінна архітектурна концепція та, певною мірою, ідеологія побудови мереж. Вона відкриває можливість інтегрувати в NGN-мережі прикладні програмні модулі як від виробника Softswitch, так і від сторонніх розробників, а також створювати власні додатки операторів і провайдерів. Для забезпечення сумісності шлюзів і softswitch-рішень стандартизовано інтерфейси API, що дозволяє незалежним розробникам розробляти прикладні сервіси без глибокої інтеграції в базову інфраструктуру. Послуги мереж нового покоління повинні компонуватися надзвичайно оперативно за принципом *plug and play,* що значно скоротить час і

трудозатрати на розробку послуг. Так створення послуг дозволяє розробляти нові програмні блоки послуг і компонувати послуги з них

Архітектура комутації NGN складається із трьох логічних рівнів. Незалежність окремих рівнів архітектури означає, що модернізація або розширення компонентів одного рівня може відбуватися без негативного впливу на інші рівні чи на стабільність роботи всієї системи. Такий підхід забезпечує високу гнучкість мережевої інфраструктури та дає змогу оперативно адаптувати її до нових бізнес-вимог і технологічних змін.

Відповідно до еталонної архітектури Softswitch, розробленої консорціумом IPCC, у ній передбачаються чотири функціональні площини (рис 1.5):

- Транспортна
- Керування обслуговуванням виклику й сигналізації
- Послуги додатків
- Експлуатаційного керування.

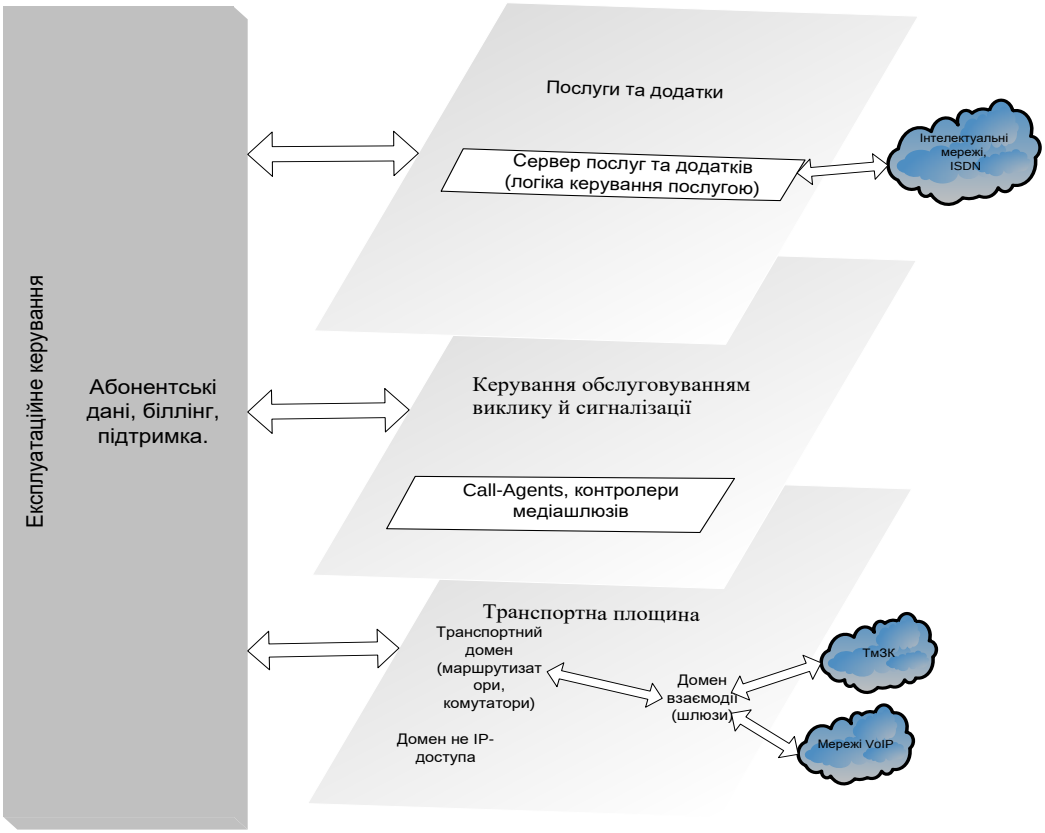


Рисунок 1.5 – Функціональні площини архітектури Softswich.

Транспортна площина (Transport Plane) виконує функцію передачі різних типів повідомлень у межах телекомунікаційної мережі. До них належать сигнальні повідомлення, маршрутизаційна інформація, необхідна для організації каналів зв'язку, а також безпосередньо мовні та інформаційні потоки користувачів. На фізичному рівні передавання таких повідомлень може реалізовуватися за допомогою будь-якої технології, що забезпечує потрібну пропускну здатність для відповідного типу трафіку. Транспортна площина також відповідає за доступ до IP-телефонних мереж як сигнальних, так і користувацьких потоків, які надходять із зовнішніх мереж або від терміналів.

Як транспортні технології можуть застосовуватися системи з часовим поділом каналів (TDM), асинхронний режим передачі (ATM) або IP-протокол. Однак мережі нового покоління переважно орієнтовані на пакетні рішення ATM та IP, що пояснюється їхньою ефективністю у використанні пропускної здатності.

Транспортна площина структурно поділяється на три основні домени:

- IP Transport Domain — домен транспортування за IP-протоколом, який відповідає за магістральну інфраструктуру та маршрутизацію IP-пакетів. До його складу належать комутатори, маршрутизатори та системи забезпечення якості обслуговування (QoS).
- Interworking Domain — домен взаємодії, у межах якого здійснюється перетворення сигнальної та користувацької інформації між зовнішніми мережами та IP-телефонією. Сюди входять сигнальні шлюзи (Signaling Gateways), медіашлюзи (Media Gateways) та шлюзи взаємодії (Interworking Gateways), які адаптують сигнальні протоколи та мультимедійні потоки до вимог IP-середовища.
- Non-IP Access Domain — домен не-IP-доступу, що забезпечує підключення терміналів, які не підтримують IP, до мережі IP-телефонії. Для цього використовуються шлюзи доступу (Access Gateways), інтегровані пристрої доступу (IAD), а також засоби підключення аналогових ліній, xDSL та радіодоступу GSM/3G. IP-термінали, зокрема SIP-телефони, можуть безпосередньо підключатися до IP-домену без участі шлюзів доступу.

Площина керування викликами та сигналізацією (Call Control & Signaling Plane) відповідає за управління ключовими елементами IP-мережі, зокрема транспортною площиною. Вона виконує функції встановлення, підтримання та завершення з'єднань на основі сигнальних повідомлень, що надходять із транспортного рівня. У цьому шарі розміщуються контролери медіашлюзів (MGC), сервери керування викликами (Call Agents), Gatekeeper-и та LDAP-сервери.

Площина послуг і додатків (Service & Application Plane) забезпечує управління сервісами IP-телефонії та їхню логіку виконання. Її основними елементами є сервери додатків (Application Servers) і сервери додаткових функцій (Feature Servers), які взаємодіють із площиною керування викликами. Крім того, цей рівень може керувати спеціалізованими мультимедійними компонентами, такими як медіасервери для конференц-зв'язку, IVR та інших сервісів.

Площина експлуатаційного керування (Management Plane) охоплює завдання адміністрування, активації абонентів і послуг, технічного обслуговування та

моніторингу мережі. Вона може взаємодіяти з іншими площинами через стандартні (наприклад, SNMP) або внутрішні протоколи та API-інтерфейси.

Softswitch у технічному сенсі являє собою комутаційний елемент, реалізований засобами програмного забезпечення, що розширює функціонал мережі через прикладні програмні інтерфейси (API). Його базова функція — управління викликами: встановлення, підтримання та завершення з'єднань аналогічно до традиційних АТС. Call Agent у складі Softswitch виконує обробку номерного плану, фіксацію моментів відповіді та завершення дзвінків, що дозволяє проводити тарифікацію.

Фактично Softswitch виконує роль центрального комутаційного вузла без фізичного комутаційного поля. Термін «Softswitch» точніше описує його функції, ніж «Call Agent», оскільки останній зазвичай означає лише програмний компонент обслуговування викликів на стандартному сервері. Часто як синонім використовують поняття контролера транспортних шлюзів (MGC), що підкреслює його роль у керуванні шлюзами через протоколи на кшталт H.248.

Модульна архітектура Softswitch забезпечує масштабованість, географічний розподіл мережі, гнучке керування сигнальними та медіапотоками, а також надійність завдяки підтримці резервування. У разі збою одного з модулів його функції можуть бути автоматично передані резервному компоненту відповідно до обраної схеми. Можливе як локальне, так і багаторівневе географічне резервування залежно від архітектури мережі та вимог оператора.

Конвергентні мережі нового покоління дозволяють реалізувати найцікавіші послуги. А до таких можна віднести інтегровані послуги телефонії, інтернет і відео. Крім того концепції NGN дозволяють швидко впроваджувати ці й нові послуги й робити їх більше простими й гнучкими для користувача. Прикладом інтегрованих сервісів може бути функція, що дозволяє ініціювати телефонний дзвінок безпосередньо з текстового документа на екрані комп'ютера, просто натиснувши на вказаний номер. За потреби до такого з'єднання може бути оперативно додано відеопотік. Крім того, за наявності відповідного обладнання на обох кінцях з'єднання можлива передача та спільне використання даних між користувачами. У підсумку впровадження рішень на основі NGN суттєво розширює можливості кінцевих користувачів, надаючи їм доступ до розширеного спектра телекомунікаційних та мультимедійних послуг.

Труднощі створення мережі NGN, з'являється тільки в тому випадку, коли оператор уже має власну мережу й більшу клієнтську базу. Тому що відмова від старої мережі й побудова замість її нової тільки з фінансової точки зору для більшості операторів є непосильним завданням. Тому виникає необхідність пошуку шляхів накладення нових принципів і нових технологій на існуючі мережі.

Історично підвищений інтерес до технології гнучких комутаторів спостерігався насамперед серед приватних операторів зв'язку, які не мали змоги інвестувати у дороге класичне комутаційне обладнання. Такі комутатори розглядалися як альтернатива традиційним місцевим і транзитним телефонним станціям.

Окремі типи застосувань, зокрема IP-телефонія для офісних мереж або передача голосу через IP-мережі, висувають до комутаторів специфічні вимоги, які не завжди передбачають повну підтримку класичних телефонних сервісів.

Прагнення операторів розширити спектр своїх послуг шляхом впровадження сервісів відеозв'язку, відеоконференцій та контакт-центрів визначило ще одну перспективну нішу для використання гнучких комутаторів.

Ефективність їх застосування залежить від відповідності конкретній сфері використання, вимогам операторів щодо надання телекомунікаційних послуг, дотримання актуальних стандартів, а також врахування особливостей існуючої мережевої інфраструктури.

1.4 Порівняння основних підходів до побудови мереж NGN

Фактично в даний час існують два основні підходи до побудови мереж NGN:

- рішення на базі гнучкого комутатора (softswitch);
- рішення на базі мультимедійної IP-подсистемы (IMS).

Ці рішення мають свої переваги та недоліки, тому для впровадження їх на мережах України необхідно знайти оптимальний підхід, що враховує обидва варіанти.

Однією з ключових переваг архітектури на основі програмного комутатора (softswitch) є її широка поширеність та відпрацьованість на практиці. У багатьох країнах світу вже функціонує значна кількість мереж, які обрали саме цей шлях розвитку. У результаті накопичено великий обсяг досвіду та технічних напрацювань, що стосуються впровадження softswitch-рішень. Різноманіття підтримуваних технологій надає операторам можливість підібрати обладнання, яке найкраще відповідає їхнім вимогам та дозволяє ефективно взаємодіяти з уже наявною інфраструктурою.

Softswitch-платформи добре масштабуються: від невеликих конфігурацій, орієнтованих на корпоративний сегмент, до розгалужених рішень для великих міжрегіональних операторів. Такий підхід дає змогу мінімізувати початкові інвестиції в розгортання NGN-мережі. Крім того, оператори можуть поступово вводити в експлуатацію нові ресурси та починати отримувати прибуток у міру їх встановлення, що підвищує гнучкість бізнес-моделі.

Разом із тим архітектура на базі програмних комутаторів має і низку недоліків. Широкий спектр обладнання різних виробників створює проблеми сумісності. Хоча центри сертифікації й тестування частково допомагають узгодити роботу пристроїв, швидкий темп оновлення програмного забезпечення унеможливлює повне охоплення всіх комбінацій. Це призводить до труднощів у взаємодії між операторами та обмежує реалізацію деяких технологічних можливостей, зокрема щодо мобільності користувачів і послуг.

Додатковою проблемою є використання фірмових систем управління мережею, які не завжди коректно інтегруються з рішеннями інших постачальників через відмінності в реалізації та функціональності.

На цьому тлі підхід, заснований на підсистемі IMS (IP Multimedia Subsystem), вигідно вирізняється наявністю чітких стандартів, що забезпечують уніфікацію та ефективну взаємодію різних мереж. Стандартизована взаємодія функціональних модулів зменшує ризики несумісності обладнання. IMS стала важливим кроком у напрямі конвергенції фіксованих і мобільних мереж, відкривши перспективи для надання роумінгових та персоналізованих мультимедійних сервісів.

Однією з основних відмінностей IMS є мультистандартний доступ: користувач може отримувати ті самі послуги через різні технології доступу (xDSL, Wi-Fi, UMTS тощо), а зміна мереж відбувається непомітно. IMS підтримує створення персоналізованих сервісів, що поєднують голос, текст, графіку та відео, а також нові послуги — Push-to-Talk, фоторозмови, миттєві повідомлення, мобільний доступ у неліцензованих діапазонах (UMA) та інші.

Порівняння архітектур softswitch та IMS показує, що обидві побудовані за трирівневою схемою та базуються на IP-мережах, але відрізняються концептуальними підходами. Softswitch зосереджується на керуванні шлюзами та конвергентному обладнанні (протоколи MGCP/Megaco, SIP для взаємодії між MGC), тоді як IMS була спочатку розроблена для IP-мереж 3G, де SIP став основним протоколом для встановлення однорангових сесій. IMS виступає насамперед як сервісна платформа, що відповідає за безпеку, авторизацію та доступ до послуг.

Характерною рисою IMS є орієнтація на протокол IPv6. Очікується, що її поширення стимулюватиме більш активне впровадження IPv6. Однак наразі це створює певні технічні виклики, адже мережі UMTS підтримують одночасно IPv4 та IPv6, тоді як IMS — лише IPv6. Тому необхідні шлюзи перетворення заголовків і адрес.

Окремої уваги заслуговує протокол SIP. Хоча його специфікація розроблена IETF, для використання в IMS він був модифікований. Через це іноді виникають ситуації, коли зовнішні системи не підтримують необхідні розширення, що може призвести до відмови у встановленні з’єднання або до його некоректної обробки.

Архітектурна подібність дозволяє будувати і ті та інші мережі, використовуючи спільне устаткування, відрізнятися буде лише ПО цього устаткування, або лише деякі елементи систем.

Традиційна орієнтація рішень на базі гнучких комутаторів виключно на надання голосових послуг поступово втрачає свою актуальність. Сучасний ринок телекомунікацій демонструє стійке зростання попиту на конвергентні технології, які забезпечують можливість подальшого розвитку мереж нового покоління (NGN) та впровадження широкого спектра сервісів, що виходять за межі класичної телефонії. По прогнозах в 2010 році на ринку устаткування управління, для мереж VoIP домінуватимуть рішення на основі архітектури IMS. У своєму прогнозі аналітична компанія Gartner Group передбачає, що архітектура IMS займе 77% ринку VoIP, а популярній зараз платформі гнучкого комутатора залишиться 23%.

1.5 Застосування технології MPLS для організації транспортної мережі в NGN

Однією з ключових технологій, які відіграють значну роль у розвитку таких мереж, є MPLS (Multiprotocol Label Switching). Вона поєднує механізми керування трафіком, притаманні канальному рівню, з масштабованістю та гнучкістю протоколів мережевого рівня. Основною відмінністю MPLS є відокремлення процесу комутації пакетів від аналізу IP-адрес у заголовках, що дає змогу значно прискорити їхнє пересилання.

Згідно з принципами роботи MPLS, маршрутизатори й комутатори на вході присвоюють кожному пакету спеціальну мітку та передають її сусіднім вузлам. Надалі маршрутизація виконується не шляхом пошуку адреси в таблиці, а за цією міткою, що забезпечує високу швидкість прийняття рішень про подальший маршрут.

Сьогодні технологія MPLS застосовується переважно в трьох напрямах:

- Керування трафіком (Traffic Engineering, TE) – оптимізація потоків даних у мережі;
- Підтримка класів обслуговування (Class of Service, CoS) – диференційований розподіл ресурсів;
- Побудова віртуальних приватних мереж (VPN) – забезпечення захищених корпоративних з'єднань поверх загальної інфраструктури.

У моделі OSI MPLS розміщується між другим (канальним) та третім (мережевим) рівнями, фактично утворюючи проміжний, так званий «рівень 2.5», на якому й відбувається комутація за мітками. Вона інтегрується в IP-, ATM- або Frame Relay-мережі, залишаючись при цьому незалежною від їхньої архітектури. Така позиція MPLS у стеку дозволяє поєднати переваги обох рівнів і створює гнучку основу для впровадження нових сервісів у мережах наступного покоління.

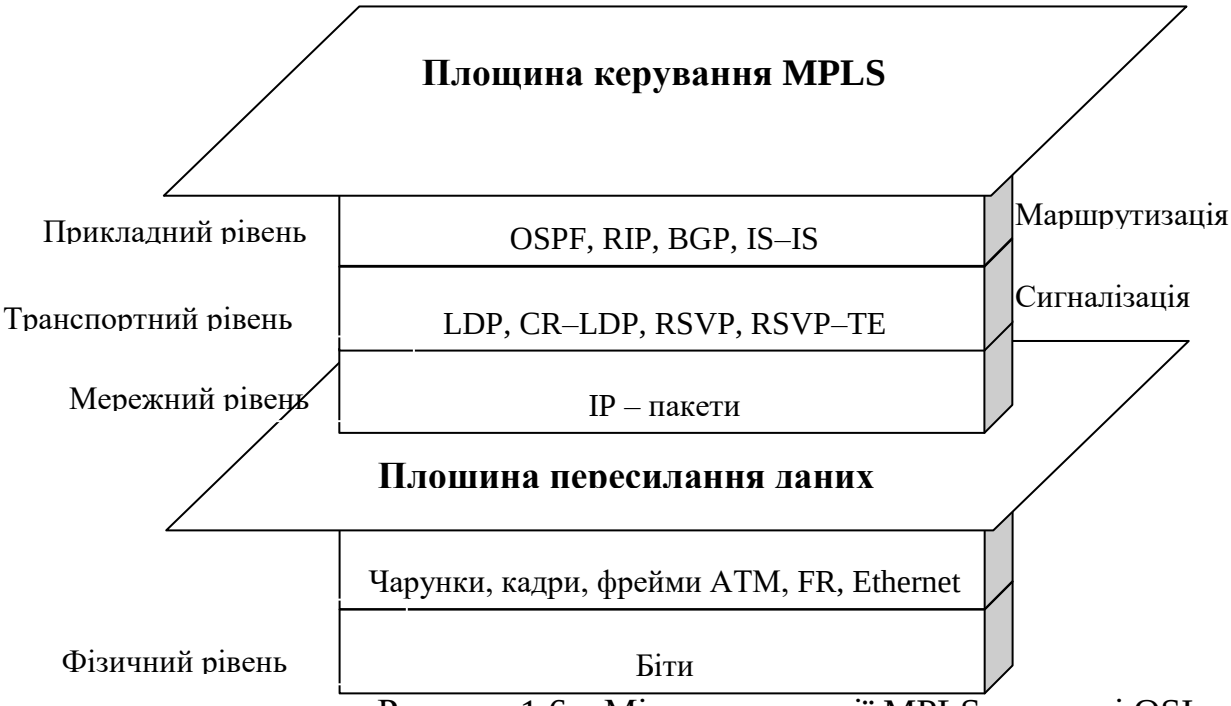


Рисунок 1.6 – Місце технології MPLS в моделі OSI

Мережевий рівень виконує ключову функцію забезпечення взаємозв'язку між кінцевими системами, що розташовані у різних підмережах, зокрема тих, які можуть бути географічно віддаленими одна від одної. Його основне завдання полягає у визначенні маршруту та організації з'єднання між вузлами, які можуть бути розділені значними відстанями та численними проміжними мережами. Саме на цьому рівні реалізується маршрутизація — процес вибору оптимального шляху через послідовність взаємопов'язаних підмереж за допомогою відповідних протоколів.

Канальний рівень, який також відомий як інформаційно-канальний, забезпечує надійну передачу даних у межах фізичного каналу зв'язку. Його функції включають організацію фізичної адресації (на відміну від логічної на мережевому рівні), визначення топології мережі, регламентацію доступу до середовища передачі, контроль за впорядкованістю доставки блоків інформації, повідомлення про помилки та управління потоками даних.

Фізичний рівень визначає електричні, механічні, процедурні та функціональні параметри активації, підтримки й деактивації фізичних каналів. До них належать характеристики сигналів (напруги та їх синхронізація), швидкість передавання, допустимі відстані, типи роз'ємів та інші технічні параметри, необхідні для фізичного з'єднання між системами.

Компонент «Multiprotocol» у назві MPLS (Multiprotocol Label Switching) вказує на її універсальність. Технологія підтримує роботу з різними протоколами мережевого рівня, виступаючи в ролі інкапсуляційного механізму, який здатний транспортувати дані будь-яких вищих протоколів незалежно від того, які саме канальні чи мережеві технології використовуються. MPLS залишається незалежною від рівнів 2 та 3 у мережах IP, ATM та Frame Relay, а також сумісною з такими протоколами маршрутизації, як RSVP (Resource Reservation Protocol) чи OSPF (Open Shortest Path First).

Комітет IETF визначив три базові структурні елементи MPLS:

- Label (мітка) — унікальний ідентифікатор фіксованої довжини, який використовується для визначення класу еквівалентності пересилання (FEC);
- FEC (Forwarding Equivalence Class) — набір пакетів, які обробляються однаково;
- LSP (Label Switched Path) — комутований за мітками маршрут, яким рухаються пакети.

Мітки мають локальне значення: кожна з них дійсна лише в межах пари сусідніх маршрутизаторів. На кожному етапі маршруту вхідна мітка замінюється на нову вихідну, яка використовується на наступній ділянці шляху. Розташування мітки всередині пакету залежить від застосовуваної канальної технології.

Передавання даних у мережі MPLS зазвичай передбачає використання стека міток, який складається з кількох елементів. Його головне призначення полягає у забезпеченні деревоподібної структури множини LSP, що сходяться в одному вузлі, а також у створенні тунелів LSP. Завдяки стеку можна об'єднати кілька маршрутів у спільний тракт MPLS — до набору міток додається одна загальна, яка забезпечує агреговане передавання даних. У кінцевій точці цей тракт розгалужується на окремі

LSP. Така схема забезпечує ієрархічну організацію маршрутизації, що є важливою перевагою MPLS.

Відповідно до правил інкапсуляції, заголовок мережевого рівня завжди розміщується після MPLS-мітки. Стек міток працює за принципом LIFO (Last In, First Out), тобто мітка, додана останньою, обробляється першою (рис. 1.7). Цей механізм забезпечує гнучке та ефективне керування потоками даних у складних багаторівневих мережах.

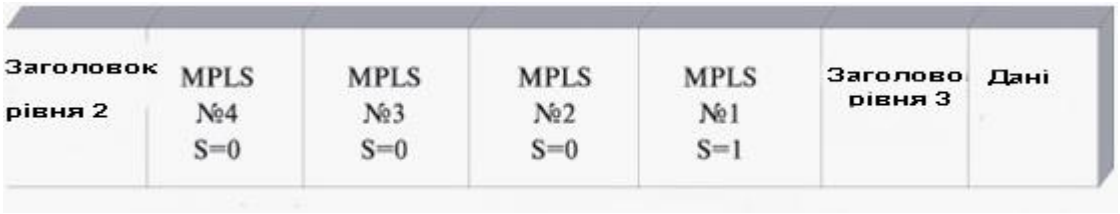


Рисунок 1.7 – Стек міток

Кожен запис стека міток містить в собі наступні поля:

1. дно стека (S);
2. час життя (TTL);
3. експериментальне поле (CoS);
4. значення мітки.

Клас еквівалентності пересилки (FEC) — це логічна група IP-пакетів, які мають однакові вимоги до способу їх передавання мережею. Усі пакети, що належать до певного FEC, обробляються маршрутизаторами однаково протягом усього шляху до пункту призначення.

Найпростішим прикладом формування FEC є об’єднання всіх IP-пакетів, адреси призначення яких відповідають певному мережевому префіксу. Проте FEC може визначатися не лише префіксом адреси, а й додатковими параметрами IP-заголовка — наприклад, інформацією про тип сервісу або іншими полями, які впливають на правила маршрутизації.

Комутований за мітками тракт (LSP, Label Switched Path) — це впорядкована послідовність MPLS-маршрутизаторів, якою передається потік пакетів, що належить до одного FEC. Кожний маршрутизатор LSR у межах цього тракту призначає пакету власну локальну мітку, що використовується для подальшої пересилки. Усередині LSP можуть створюватися LSP-тунелі — логічні шляхи, які дозволяють передавати великі обсяги трафіку. Якщо обсяг даних є надто великим, між відправником і отримувачем може бути сформовано декілька паралельних тунелів, що забезпечує гнучке балансування навантаження. Один LSP може включати кілька таких тунелів із різними точками входу й виходу, що підвищує ефективність маршрутизації.

Будь-який IP-пакет на вході в MPLS-мережу — незалежно від того, надходить він безпосередньо від відправника чи з іншої MPLS-мережі вищого рівня — спершу класифікується за певним FEC. Аналіз заголовка та віднесення пакету до конкретного класу еквівалентності виконуються лише один раз — на етапі входу в мережу. На рис. 1.8 наведено приклад типової структури MPLS-мережі, яка демонструє взаємодію FEC, LSP та маршрутизаторів LSR у процесі комутації пакетів за мітками.

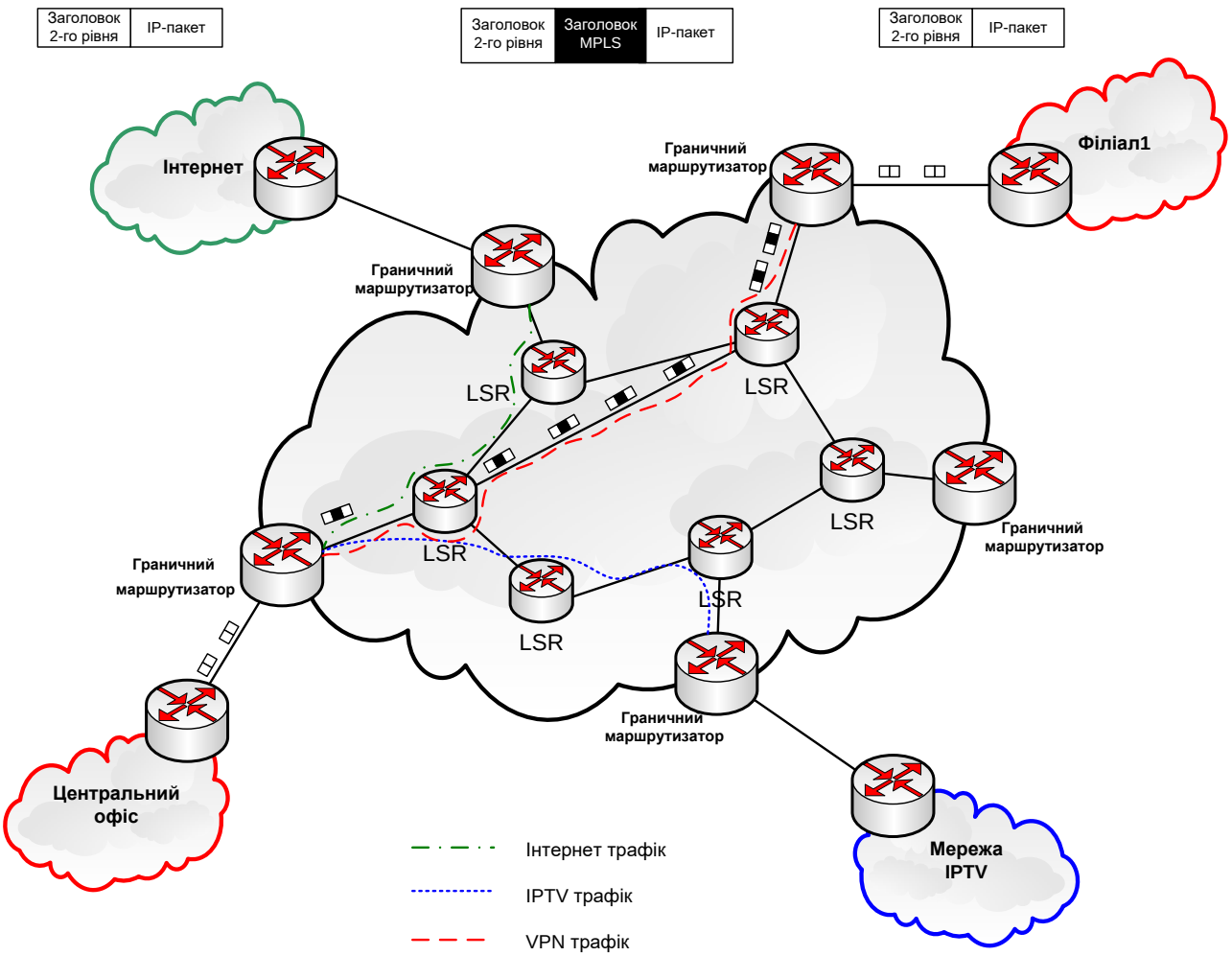


Рисунок 1.8 – Типова структура мережі MPLS та схема проходження пакетів.

Роботу мережі з використанням комутації міток можна представити послідовністю декількох завершених етапів.

На першому етапі відбувається автоматичне створення таблиць маршрутизації. У цьому процесі задіяні IP- або IP-ATM-маршрутизатори, розташовані в мережі оператора. Для обміну топологічною інформацією та побудови таблиць використовуються внутрішні протоколи маршрутизації, зокрема OSPF та IS-IS.

Другий етап полягає в застосуванні протоколу розподілу міток LDP (Label Distribution Protocol), який, базуючись на вже сформованих таблицях маршрутизації, визначає мітки для сусідніх вузлів і формує тракти з комутацією за мітками — LSP (Label Switched Paths). Автоматичний розподіл міток є однією з ключових переваг MPLS, оскільки виключає необхідність ручного налаштування, як у випадку з класичними віртуальними каналами.

На третьому етапі пакет надходить до граничного маршрутизатора LSR (Label Switch Router). Цей пристрій визначає, які сервіси мережевого рівня повинні бути застосовані (наприклад, керування смугою пропускання або механізми якості обслуговування — QoS). Враховуючи усі політики маршрутизації та параметри обробки, маршрутизатор присвоює пакету відповідну мітку, додає її до заголовка та передає пакет далі в мережу.

Четвертий етап відбувається всередині магістральної мережі: проміжні LSR зчитують наявну мітку кожного пакета, замінюють її новою згідно з локальною таблицею відповідностей та пересилають далі по шляху. Ця операція повторюється на кожному транзитному вузлі.

П’ятий етап завершує процес: на виході з MPLS-мережі граничний LSR видаляє мітку, виконує аналіз IP-заголовка та передає пакет у напрямку кінцевого пункту призначення. Попереднє обчислення таблиць комутації дозволяє уникнути повторного аналізу заголовків у кожному проміжному вузлі, що значно підвищує ефективність обробки трафіку. Такий підхід забезпечує масштабованість рішення та дає змогу застосовувати різні набори політик для розподілу міток, відокремлюючи процедуру комутації від вмісту IP-заголовків. Завдяки локальному характеру міток навіть у великих мережах не виникає проблеми з їх нестачею.

Однією з ключових особливостей MPLS є поділ мережі на ядро та граничну область. У ядрі зосереджені високопродуктивні комутаційні пристрої, які виконують мінімальний набір функцій — підтримку MPLS і пересилання трафіку. Натомість граничні маршрутизатори відповідають за класифікацію трафіку за FEC, реалізацію сервісних політик, балансування навантаження та управління трафіком. Такий розподіл дозволяє оптимізувати використання обчислювальних ресурсів: складна обробка відбувається на межі мережі, а швидке комутування — у її ядрі.

Відокремлення комутації від IP-маршрутизації відкриває нові можливості. Наприклад, сегменти LSP можуть не збігатися з маршрутами, які обрав би традиційний IP-протокол, а класифікація за FEC може ґрунтуватися не лише на IP-адресах, а й на інших параметрах — пріоритетах, RSVP-потоках тощо. Така гнучкість реалізується у звичайних мережах складніше, тоді як MPLS робить її масштабованою та ефективною.

Розвиток MPLS став поштовхом до створення уніфікованої архітектури керування транспортними мережами, що привело до появи GMPLS (Generalized MPLS). Традиційно IP-трафік у магістральних мережах передавався поверх ATM та SDH/SONET, при цьому керування маршрутизацією, розподілом ресурсів і сигналізацією виконувалося на кожному рівні окремо. GMPLS об’єднує ці функції та поширює можливості MPLS на канальний і фізичний рівні.

GMPLS підтримує різні типи комутацій — PSC (Packet Switching Capable), L2SC, TDM, DWDM, FSC тощо. Архітектура поділяється на control plane (площину керування) та data plane (площину пересилки), причому перша додатково розділена на маршрутизаційну та сигнальну частини. Для внутрішньодоменної маршрутизації використовуються OSPF-TE та IS-IS-TE з відповідними розширеннями. Також передбачено використання протоколів міждоменної маршрутизації (BGP), робота над якими триває на етапі попередніх стандартів.

Для сигналізації розроблено окремий протокол LMP (Link Management Protocol), який забезпечує контроль цілісності каналів, виявлення та локалізацію помилок, а також надання інформації про характеристики з’єднань. Архітектура не накладає обмежень на спосіб організації службових каналів, але передбачає використання IP для передачі маршрутної та сигнальної інформації.

Щоб підтримувати різні типи інтерфейсів, GMPLS вводить узагальнену мітку, яка містить інформацію, необхідну для побудови LSP у мережах з різною технологічною основою (пакетна комутація, TDM, оптичні системи тощо). Така мітка може відповідати часовому слоту, довжині хвилі або окремому волокну. Структура мітки включає тип LSP, спосіб пересилки та ідентифікатор навантаження, що дозволяє ефективно передавати різні типи трафіку, зокрема ATM, Ethernet, SDH/SONET.

При формуванні узагальнених трактів G-LSP ресурси нижчих рівнів резервуються послідовно, що забезпечує ієрархічну побудову з'єднань (див. рис. 1.9). Ця концепція ієрархії є одним з ключових елементів GMPLS.

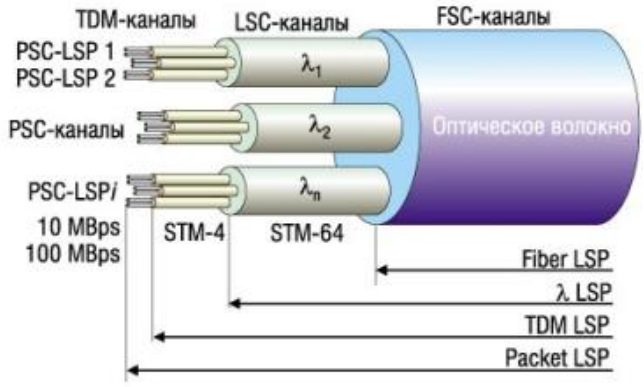


Рисунок 1.9 – Ієрархія LSP

У стратегічній перспективі **GMPLS** розглядається як одна з ключових технологій для створення телекомунікаційних мереж наступного покоління. Її впровадження відкриває можливість надання нових типів сервісів, зокрема динамічного виділення пропускної спроможності на вимогу та організації **оптичних приватних мереж (OVPN)**.

Попри те, що окремі аспекти реалізації GMPLS ще потребують глибших технічних досліджень, експертні прогнози свідчать: у найближчі роки очікується широке розповсюдження цієї технології в глобальних телекомунікаційних інфраструктурах. Це зумовлено її гнучкістю, сумісністю з різними транспортними рівнями та здатністю підтримувати складні багаторівневі сервіси, які виходять за межі можливостей традиційних мереж.

1.6 Багатовимірні мережі як перспектива розвитку мереж NGN

Перехід від традиційних інфокомунікаційних мереж до архітектури NGN полягає у формуванні на базі новітніх технологій та програмно-технічних засобів єдиного середовища, що забезпечує надання користувачам нових видів послуг, одночасно підтримуючи вже існуючі сервіси мобільних і фіксованих операторів.

Відповідно до Рекомендацій МСЕ-Т Y.2001 та Y.2011, NGN — це мережа з пакетною передачею даних, здатна підтримувати надання електрозв'язкових сервісів з використанням кількох широкосмугових транспортних технологій, при цьому функції надання послуг відокремлені від транспортних технологій.

Сучасні інфокомунікаційні мережі складаються не лише з транспортної та доступової частин, а й включають мережі синхронізації, сигналізації, керування, передавання часових сигналів тощо. Кожна з них має власні технічні та обчислювальні ресурси, які використовуються для виконання визначених завдань. Хоча між цими мережами існує взаємодія, вона обмежена конкретними задачами та не розглядається як фундаментальний принцип розвитку системи в цілому.

Попри складність прогнозування точної архітектури мереж майбутнього, аналіз теоретичних досліджень у галузі складних систем і мережевих структур дозволяє сформулювати певні припущення. Імовірно, ключовою характеристикою таких мереж стане багатовимірність. Такий підхід розглядається як спосіб інтеграції різнорідних елементів в єдину систему. Багатовимірні мережі не потребуватимуть жорсткого поділу на транспортні, доступові та сервісні складові — усі функції реалізовуватимуться в межах єдиної інтегрованої структури.

Використання багатовимірної архітектури та багатоядерних обчислювальних систем у вузлах мережі дозволить організувати взаємодію за спрощеною схемою: Користувач → Багатовимірна мережа → Користувач. Внутрішня структура FGN забезпечуватиме доступ, транспорт, сервісні та допоміжні функції без необхідності чіткого розмежування.

Спільне використання обчислювальних ресурсів та пам’яті, подібної до багатовимірної пам’яті суперкомп’ютерів, відкриває перспективи максимально ефективного використання можливостей мережі. Перехід до такої архітектури можна розглядати як один із найсуттєвіших чинників, що відрізнятиме FGN від сучасних рішень, зокрема від NGN.

Багатовимірна структура означає розвиток мереж не лише у двох чи трьох, а у N-вимірах, де $N > 3$. За таких умов постає потреба в N-вимірному представленні даних, що математично ґрунтується на використанні багатовимірних матриць та масивів — підхід, який уперше запропонував Габрієль Крон ще у 1930-х роках під час розробки тензорного аналізу електричних ланцюгів.

Отже, FGN можна визначити як багатовимірну та багаторівневу мережу, яка інтегрує транспортну, сигнальну, синхронізаційну та сервісну інфраструктури в єдине середовище. Це дозволяє забезпечити надійне, якісне та безпечне надання різноманітних послуг користувачам, використовуючи спільні ресурси мережі максимально ефективно.

2 СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ

2.1 Огляд стану розвитку та впровадження нових технологій управління мережами зв’язку

Сучасний рівень розвитку інформаційних мереж створює передумови для впровадження глобальної інформаційної інфраструктури (ГІІ), яка забезпечує користувачам доступ до всіх видів комунікаційних послуг з високими показниками якості, за прийнятною вартістю, у будь-якому місці та в будь-який час. Для досягнення таких вимог необхідно формувати більш гнучку архітектуру системи управління, здатну оперативно підтримувати впровадження нових послуг і гарантувати їх стабільне функціонування на всій території глобальної мережі.

Зі зростанням кількості послуг та підвищенням їх складності прогнозується суттєве збільшення обсягу керуючої інформації в системах управління. Унаслідок цього може виникнути ситуація, коли управлінська підсистема почне перевищувати за масштабом основну мережу. Тому одним із ключових завдань сучасних систем управління є визначення мінімально необхідного обсягу керуючих даних, достатнього для забезпечення стабільної роботи мережі з потрібною точністю параметрів.

Інтенсивний розвиток телекомунікацій у напрямку розширення масштабів мереж, ускладнення їх структури, збільшення кількості послуг і операторів, що обслуговують взаємопов’язані мережі різних власників, а також підвищення вимог до надійності, якості обслуговування та економічної ефективності, зумовили потребу створення універсальної та надійної системи управління.

Метою управління телекомунікаційними мережами, зокрема автоматизації процесів управління, є забезпечення оптимальної роботи систем зв’язку відповідно до їх призначення з мінімальними матеріальними, фінансовими та трудовими витратами. Основним завданням управління є підтримання стабільного функціонування засобів зв’язку в умовах постійного розвитку, модернізації та змін зовнішнього середовища.

Сучасним системам управління властиві такі ознаки:

- висока складність організації;
- широкі функціональні можливості;
- суворі вимоги до захисту інформації;
- підвищена надійність і точність;
- розподіленість на великій території.

Процес управління є багатокомпонентним і охоплює такі основні функції:

• прогнозування — науково обґрунтоване передбачення можливих напрямків розвитку об’єкта управління;

• планування — визначення цілей, методів і шляхів їх досягнення;

• організація — формування структури об’єкта і розподіл функцій між елементами системи;

• координація та регулювання — забезпечення узгодженості дій виконавців;

• стимулювання — активізація діяльності персоналу через матеріальні або моральні засоби;

• облік — фіксація фактичного стану системи;

• контроль — порівняння досягнутих результатів із запланованими;

• аналіз — виявлення причин відхилень і пошук шляхів їх усунення.

Залежно від функціонального призначення, управління телекомунікаційними мережами поділяється на технічне, функціональне, оперативне та координаційне.

Основні напрями їх реалізації:

• підтримання працездатності обладнання та усунення відмов (технічне управління);

• узгодження робочих процесів і підвищення ефективності функціонування (функціональне управління);

• забезпечення якості обслуговування та адаптації мережі до змінних умов (оперативне управління);

• усунення внутрішніх конфліктів і вдосконалення організації (адміністративне управління);

• розробка нових технічних рішень і оцінювання їх ефективності (управління розробками);

• розвиток мережі, розширення кількості користувачів і номенклатури послуг (управління розвитком).

Оскільки перелічені види управління взаємопов’язані, ефективність управлінської системи досягається завдяки комплексному вдосконаленню кожного з її елементів. Важливо, щоб уся система мала єдину інтегровану структуру управління та взаємодії.

Для реалізації глобальних завдань у сфері інформатизації функціонує Міжнародний союз електрозв’язку (МСЕ), який координує створення міжнародних мереж і формує основні напрями розвитку ГІ. У діяльності МСЕ беруть участь провідні спеціалісти майже двох сотень країн світу. На основі досвіду, накопиченого протягом багаторічного розвитку систем зв’язку у США, Франції, Великій Британії, Японії, Іспанії, Нідерландах, Бельгії, Тайвані та інших країнах, були розроблені сучасні технології управління, які забезпечують виконання комплексу вимог до ефективності та надійності мереж.

Одним із прикладів є система **TMN**, створена компанією **AT&T**, яка постійно вдосконалюється. Вона призначена для управління навантаженням у міжнародних, національних, регіональних, локальних та приватних мережах, а також для збору та обробки даних щодо стану обладнання, напрямків і каналів зв’язку. Завдяки високій швидкості збору інформації та обчислювальним можливостям система здатна обслуговувати сотні комутаційних станцій із підключеними каналами. Вона має гнучкий інтерфейс користувача з графічними дисплеями, які відображають як глобальну, так і локальну структуру мережі.

TMN забезпечує виконання функцій управління конфігурацією, контролю якості обслуговування, діагностики несправностей, планування розвитку та тарифікації послуг. Її модульна архітектура дозволяє адаптацію до мереж різної структури. У випадку критичних ситуацій система здатна оперативно реагувати на зміни, а також може бути модернізована для підтримки інтелектуальних мереж і сигналізації ЗКС-7.

Аналіз технічних рішень провідних світових компаній свідчить, що:

- у розвинених країнах активно створюються автоматизовані системи управління зв’язком, які підвищують ефективність і надійність роботи мереж;
- управління охоплює моніторинг, діагностику, керування навантаженням, планування розвитку, тарифікацію послуг тощо;
- розвиток мереж і розширення спектру послуг вимагають підвищеної гнучкості, адаптивності та оперативності систем управління;
- ефективне функціонування великих і складних мереж можливе лише за умови централізованого та автоматизованого управління;
- сучасні системи будуються за ієрархічним або модульним принципом;
- особлива увага приділяється сумісності обладнання різних виробників, стандартизації та уніфікації рішень;
- для удосконалення управління впроваджуються інтелектуальні технології, експертні системи, нейронні мережі та нові програмні підходи;
- перспективними вважаються системи, що базуються на технології пакетної комутації.

Усі ці заходи спрямовані на підвищення ефективності, зниження витрат та поліпшення якості управління телекомунікаційними мережами.

Телекомунікаційна галузь залишається однією з найдинамічніших як в Україні, так і у світі. Вітчизняні мережі демонструють не лише кількісне, а й якісне зростання. Серед основних характеристик сучасного стану галузі можна виділити:

- технологічну неоднорідність мереж;
- зміну пріоритетів в управлінні у зв’язку з упровадженням нових технологій;
- необхідність координації взаємодії мереж різних операторів;
- підвищені вимоги до надійності й якості обслуговування;
- створення та розвиток національної та глобальної інформаційної інфраструктури;
- зростання попиту на різноманітні послуги зв’язку;
- потребу у координації діяльності постачальників і користувачів послуг;
- зростання значення ефективного управління ресурсами мереж.

У світовій практиці простежується тенденція переходу до мультисервісних мереж нового покоління, що об’єднують телефонний, мобільний, інтернет- і телевізійний зв’язок у єдину архітектуру. Найперспективнішим напрямом розвитку є створення оптичних транспортних мереж із надвисокою пропускною здатністю на основі технології **DWDM**, що забезпечує ефективне використання спектра та підтримку зростаючих потреб користувачів.

2.2 Загальна концепція створення системи управління мереж NGN

Найбільш придатною основою для формування глобальної інформаційної інфраструктури (ГІІ) вважається платформа **NGN (Next Generation Network)** — тобто мережа наступного покоління. NGN являє собою цілісну, багаторівневу структуру, що охоплює різні типи наявних мереж і забезпечує їхню ефективну взаємодію та узгоджене функціонування. Архітектура NGN розвиває та

вдосконалює найрезультативніші підходи, які раніше були реалізовані в інтелектуальних мережах зв’язку.

Концепція інтелектуальної мережі ґрунтується на принципі розділення функцій керування на дві основні групи — управління додатковими сервісами (послугами) та управління процесом встановлення з’єднань. У таких мережах кожен із цих типів функцій реалізується за допомогою окремих технічних засобів, що взаємодіють між собою за визначеними правилами. Завдяки поділу функцій стало можливим впроваджувати нові послуги без необхідності змінювати структуру або налаштування існуючих вузлів мережі. Сервісна логіка, представлена у вигляді програмного забезпечення, може розміщуватися у будь-якому фізичному вузлі, що робить систему більш гнучкою, масштабованою та простою в модернізації.

Головна відмінність мереж NGN від традиційних інтелектуальних систем полягає в тому, що їхня архітектура побудована на концепції **конвергенції фіксованих і мобільних мереж (Fixed-Mobile Convergence, FMC)**. Це означає, що NGN забезпечує єдине середовище для передавання голосових, відео- та інформаційних даних незалежно від типу мережі доступу, що створює умови для надання універсальних телекомунікаційних послуг користувачам будь-де й у будь-який час.

Система управління мережею NGN відіграє ключову роль, адже саме вона відповідає за раціональне використання всіх наявних технічних ресурсів і забезпечення стабільного функціонування мережі навіть за складних умов експлуатації. Її головне завдання полягає в підтриманні оптимальної якості обслуговування користувачів, дотриманні заданих технічних параметрів і швидкому реагуванні на зміни в структурі чи навантаженні мережі.

В теорії управління існують два методи побудови мереж: системи управління централізованого і розподіленого типів. Зазвичай перші рішення використовують в мережах, де потрібно розв’язувати відносно прості завдання. У міру ускладнення мереж системи управління послідовно еволюціонують від централізованого до розподіленого типу. Саме така тенденція існує в эволюції рішень рівня управління. Послідовний перехід від централізованих вирішень до розподілених отримав назву принципу декомпозиції, який грає істотну роль в розвитку рішень рівня управління. Принцип декомпозиції полягає в послідовному розділенні завдань управління між різними пристроями і підсистемами. Зараз практично у всіх пристроях NGN присутні мікроконтролери, функціональні можливості яких постійно зростають, отже, складність управління системою NGN пропорційно збільшується. Щоб впоратися із зростаючим об'ємом завдань управління, функції управління повинні розміщуватися усередині кожного мікроконтролера, що виконує частину завдань управління, що відноситься до даного пристрою управління.

Всі сучасні концепції управління NGN ведуть свій початок від телефонних мереж, хоча в процесі еволюції запозичували багато рішень з комп'ютерних мереж, розподілених баз даних і мереж пакетної передачі.

Управління в ТФОП реалізовано розподіленими методами. Кожна електронна АТС має власну систему управління, керовану процесором. Процесор виконує дві функції: зовнішня – встановлення з'єднань і внутрішні - управління станцією.

Починаючи з ТФОП, можна виділити наступні п'ять етапів декомпозиції в сучасних системах управління :

1. Перехід до концепції ОКС №7, яка привела до розділення завдань обміну сигналізацією і завдань обміну даними (мовними сигналами). На цьому етапі система зв'язку розділилась на мережу сигналізації і мережу комутації.
2. Розробка концепції інтелектуальних мереж (IN), яка передбачала розділення функцій усередині системи сигналізації на функції обміну сигнальними повідомленнями і функції забезпечення доступу до нових послуг.
3. Поява елементів NGN і перехід до гібридних мереж ОКС №7/ NGN. На цьому етапі з'явився пристрій Softswitch, який по суті реформував спільні принципи управління мережами. Концепція Softswitch передбачає розділення завдань забезпечення управлінням різними процесами в мережі NGN між цілими сімействами різних пристроїв: медіа-шлюз (MG), контролер медіашлюзів (MGC), сигнальний шлюз (SG), шлюз транспортних каналів (TG).
4. Просування концепції Softswitch як домінуючому в існуючих мережах зв'язку одночасно з активним процесом декомпозиції завдань Softswitch між різними пристроями. В результаті з'явилися багаторівневі концепції Softswitch.
5. Поява нової концепції IMS, яка є остаточною декомпозицією ядра концепції Softswiich, - MGC у зв'язку з процесами конвергенції між мобільними і проводовими системами зв'язку. На сучасному етапі розвитку концепції IMS продовжується процес декомпозиції різних пристроїв у складі IMS-платформ.

Система управління мережею **NGN** повинна являти собою комплекс рішень, спрямованих на ефективне управління мережами, побудованими на основі різних технологій — як фіксованих, так і мобільних телефонних систем, мереж передавання даних, сигналізаційних систем тощо. Вона має забезпечувати підтримку широкого спектра послуг, що надаються з використанням обладнання численних виробників, гарантуючи при цьому сумісність і стабільність функціонування мережі.

Відповідно до сучасних тенденцій розвитку галузі, концептуальний підхід до проєктування систем підтримки експлуатації телекомунікаційних мереж (**Operation Support System, OSS**) змістився від управління суто технологічними процесами до управління сервісами, орієнтованими безпосередньо на кінцевого користувача.

Системні інтегратори вже тривалий час активно впроваджують рішення як для корпоративних клієнтів, так і для операторів зв’язку. Одним із перших кроків на цьому шляху стало впровадження **Triple Play Service (TPS)** — концепції, що дозволяє поєднати традиційну передачу голосу та даних із послугами відеотрансляції та мультимедійного контенту.

Завдяки цьому оператори отримали змогу надавати не лише класичні послуги кабельного телебачення, а й інноваційні інтерактивні сервіси, можливі виключно у межах пакетних мереж.

Еволюція та подальший розвиток інтерактивних послуг призводить до зростання середнього доходу з одного абонента (**ARPU**) і, відповідно, до підвищення загальних прибутків операторів. У міру збільшення кількості користувачів, підключених до сервісів Triple Play, зростає і значення інтерактивної

реклами як додаткового джерела доходу. Це, у свою чергу, актуалізує потребу в модернізації **OSS/BSS-систем**, які мають підтримувати нові бізнес-моделі операторів у контексті швидкого розширення спектра послуг, ускладнення архітектури мереж, а також появи нових маркетингових і керівних функцій.

З точки зору управління, **NGN** характеризується тим, що ці мережі включають більшу кількість різнорідних компонентів у порівнянні з традиційними системами, які базуються на обмеженій кількості великих комутаційних пристроїв. Крім того, NGN підтримує ширший набір інтерфейсів і протоколів, що зумовлює необхідність перегляду традиційних принципів управління мережею та розробки нових підходів до її адміністрування.

Система управління **NGN** створюється за принципами **об'єктно-орієнтованої розподіленої структури**, що дозволяє ефективно реалізувати управління мережами, побудованими на основі різних технологій і технічних платформ.

Архітектура такої системи є **відкритою та модульною**, що забезпечує можливість інтеграції нових функціональних модулів, модернізації вже існуючих і взаємодії з програмними додатками інших виробників.

Для забезпечення сумісності та інтегрованого управління системами й мережами незалежно від технологічних особливостей і постачальників застосовуються різні міжнародні стандарти та протоколи, серед яких **SNMP, OSI, ASCII, CORBA**.

Найпоширенішим де-факто стандартом у мережах передавання даних є **SNMP**, тоді як модель **TMN** передбачає використання протоколів **OSI**. Проте практична реалізація систем управління на базі TMN виявилася досить складною, повільною та витратною, оскільки не повною мірою охоплювала питання управління послугами.

У зв'язку з цим дедалі більшої популярності набувають рішення, побудовані на архітектурі **CORBA**, які особливо ефективні на верхніх рівнях управління.

Інтерфейси системи управління NGN повинні бути **відкритими та стандартизованими**. Основними їх характеристиками є використання загальноприйнятих протоколів (таких як **CMIP, SNMP, FTP, FTAM**), формальних мов опису (**CORBA IDL, JAVA, GDMO, ASN.1**) і забезпечення стабільності, що дозволяє вносити лише взаємно сумісні зміни.

Наприклад, для передавання аварійних повідомлень можуть використовуватись протоколи **CMIP**, **SNMP** або **CORBA** з об'єктною моделлю, визначеною у рекомендації **X.733**; для організації послуг — інтерфейси **CORBA**; а для передавання даних про експлуатаційні характеристики — протокол **FTP**. Основні вимоги, що висуваються до системи управління мережами NGN, передбачають дотримання низки ключових умов:

• Розроблене рішення повинно мати практичну реалізацію у максимально короткі терміни.

• Архітектура відкритих систем має гарантувати гнучкість упровадження, сумісність з іншими технічними рішеннями, високу надійність та, як наслідок, належну якість обслуговування користувачів.

• Оператор повинен мати можливість самостійно змінювати програмне забезпечення для реалізації специфічних функцій, а також впроваджувати нові послуги шляхом модифікації конфігурації.

• Модульний підхід і компонентна структура спрощують процес підключення нових користувачів і впровадження додаткових функцій.

Гнучкість і масштабованість системи дають змогу швидко адаптуватися до динамічного розвитку телекомунікаційних технологій.

Економічна ефективність упровадження адаптивних інформаційних систем забезпечується завдяки зменшенню витрат на адміністрування та технічне обслуговування мереж, скороченню інфраструктурних витрат, економії обчислювальних ресурсів і каналів зв'язку, а також підвищенню ефективності використання ІТ-ресурсів у цілому.

Необхідність створення, основні завдання, визначення функцій та принципи організації системи управління міжнародними мережами висвітлено в рекомендаціях МСЕ серії Е.410–Е.414. У цих документах також описано способи досягнення поставлених цілей.

Згідно з рекомендацією Е.410 МСЕ, управління міжнародною мережею охоплює весь комплекс дій, спрямованих на мінімізацію впливу будь-яких ситуацій, які негативно позначаються на її функціонуванні.

До таких ситуацій належать:

• вихід з ладу національних чи міжнародних центрів комутації;

• пошкодження систем передачі даних на національному або міжнародному рівнях;

• планові відключення центрів комутації чи систем передачі;

• аномальний або раптовий сплеск трафіку, зумовлений прогнозованими чи непередбачуваними подіями;

• локальні або глобальні перевантаження мережевих сегментів;

• труднощі, що виникають при забезпеченні міжнародного інформаційного обміну.

Ключові принципи управління інтелектуальними мережами (ІМ) включають:

• максимальне використання всіх доступних маршрутів передавання;

• забезпечення обслуговування трафіку з найбільшою імовірністю успішного завершення з'єднання;

• пріоритетну обробку викликів за мінімальною довжиною шляху;

• зменшення перевантаження комутаційних систем і своєчасне відключення при перевищенні допустимого рівня навантаження.

Основні переваги застосування системи управління ІМ полягають у:

• зростанні прибутковості за рахунок збільшення кількості успішно встановлених з'єднань;

• покращенні якості обслуговування користувачів;

• раціональнішому використанні ресурсів мережі;

• глибшому розумінні стану та якості її роботи;

• забезпеченні стабільності доходів і надійності критично важливих служб, зокрема у випадку виникнення екстремальних або аварійних ситуацій.

У процесі аналізу стану мережі МСЕ рекомендує здійснювати порівняння контрольованих параметрів із заданими пороговими значеннями. При цьому прийняття управлінських рішень щодо доцільності конкретних дій покладається на обслуговуючий персонал. Водночас, у сучасній практиці активно досліджуються та впроваджуються методи керування, що базуються на використанні елементів штучного інтелекту.

Відповідно до концепції МСЕ, у рекомендаціях зазначається, що:

• децентралізовані системи управління простіше впроваджувати, оскільки вони потребують меншої кількості висококваліфікованих спеціалістів;

• централізоване управління забезпечує повніший огляд стану мережі, доступ до ширшого обсягу інформації, ефективнішу взаємодію між адміністраціями, що сприяє прийняттю оптимальних рішень і дозволяє зменшити потребу в персоналі.

Мережі пакетної комутації, які забезпечують взаємодію вузлів інтелектуальної надбудови, за своєю природою не можуть функціонувати без гнучкого й динамічного управління.

У відповідних рекомендаціях наведено широкий перелік функцій оперативного керування, планування та необхідних інформаційних параметрів для забезпечення їх виконання. У мережах із автоматичною комутацією можливості керування здебільшого обмежуються технічними характеристиками комутаційних станцій. Саме тому МСЕ наголошує на важливості оцінки здатності комутаційного обладнання підтримувати повноцінне управління мережею ще до його придбання.

У рекомендації Е.414 зазначено, що структура управління міжнародною мережею включає три основні складові:

• планування та координацію взаємодії елементів системи управління;

• контроль якості функціонування та технічного стану мережі, а також реалізацію необхідних коригувальних дій;

• постійний розвиток і вдосконалення системи управління мережею.

2.3 Мережа управління зв’язком - TMN

Міжнародний союз електрозв’язку з питань телекомунікацій (ITU-T) визначає мережу управління телекомунікаціями (Telecommunication Management Network, TMN) як спеціалізовану систему, призначену для контролю, моніторингу та управління роботою телекомунікаційних мереж. Для забезпечення взаємодії з іншими телекомунікаційними структурами TMN використовує один або декілька інтерфейсів. Така мережа може бути як логічно інтегрованою частиною телекомунікаційної системи, так і фізично відокремленою від неї, функціонуючи як самостійна мережа.

Усі ресурси, що входять до складу телекомунікаційної системи — незалежно від їх технічних характеристик і функціонального призначення — називають **мережевими елементами (Network Element, NE)**. Безпосереднє керування цими елементами виконує **система підтримки операцій (Operations Support System, OSS)**. Основні принципи побудови TMN, її архітектура, функціональні блоки, взаємодія компонентів та інтерфейсів детально описані у специфікації **ITU-T M.3010**.

Головним принципом побудови TMN є логічне відокремлення мережі управління від самих телекомунікаційних мереж і послуг, якими вона керує. Це забезпечує можливість розподілу функцій управління, що дозволяє реалізовувати як централізовану, так і децентралізовану структуру керування. Завдяки цьому оператор телекомунікацій може одночасно контролювати роботу великої кількості розподіленого обладнання, мереж і послуг з кількох адміністративних центрів.

Відповідно до рекомендацій ITU, мережа TMN призначена для виконання комплексу завдань, пов'язаних з управлінням телекомунікаційними мережами та сервісами операторів. До основних функцій TMN належать планування, розгортання та введення в експлуатацію нових систем і послуг, технічна підтримка, експлуатаційне та адміністративне управління. Повний спектр функціональних можливостей TMN включає:

• обмін службовою інформацією через інтерфейси з іншими мережами управління (іншими TMN);

• перетворення даних управління у стандартизовані формати, що забезпечують єдину логіку обробки інформації в межах мережі;

• передавання інформації управління між різними вузлами системи;

• аналіз, обробку та реагування на отримані дані;

• адаптацію інформації до форми, зрозумілої кінцевому користувачеві;

• доставку інформації управління користувачам;

• захист даних від несанкціонованого доступу.

Згідно з рекомендацією **M.3010 MCE**, TMN створює структуроване середовище для забезпечення взаємодії між різними операційними системами, що здійснюють управління мережами електрозв'язку, та їх обладнанням на основі стандартизованих протоколів і відкритих інтерфейсів.

Варто зазначити, що TMN не замінює наявні системи управління та технічного обслуговування, необхідні для забезпечення процесів надання послуг користувачам. Такі системи виступають клієнтами TMN. Історично TMN була спроектована як інструмент управління телекомунікаційними мережами, проте в ієрархії управлінських функцій вона включає і рівень управління послугами, що відповідає інтелектуальній надбудові **інтелектуальних мереж (ІМ)**. Таким чином, TMN забезпечує основу для функціонування системи управління ІМ.

Згідно з концепцією TMN (див. рис. 2.1), система управління має багаторівневу ієрархічну структуру, що складається з таких рівнів:

• рівень мережевих елементів (нижній рівень);

• рівень управління елементами мережі;

• рівень управління мережею;

• рівень управління послугами;

• рівень управління діяльністю (найвищий рівень).

Найнижчий рівень охоплює власне телекомунікаційну мережу, тобто об'єкт управління. До мережевих елементів можуть належати комутаційні станції, системи передавання сигналів, мультиплексори, тестові комплекси та інше обладнання.

Кожен наступний рівень у структурі має вищий ступінь узагальнення даних порівняно з попереднім. Інформаційні потоки про стан мережі рухаються вгору

ієрархією, тоді як керуючі сигнали передаються згори вниз. Рівень автоматизації процесів управління може варіюватися — від повністю автоматизованих до частково ручних процедур. Зазвичай із підвищенням рівня ієрархії ступінь автоматизації зменшується, що пов’язано зі складністю аналітичних і стратегічних завдань, які виконуються на верхніх рівнях системи.

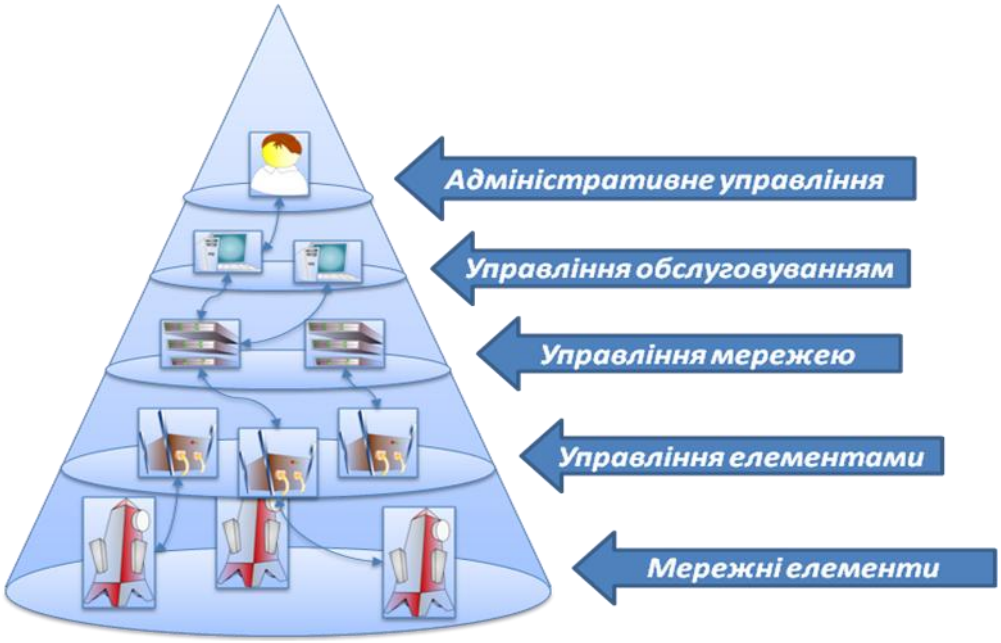


Рисунок 2.1 – Рівні управління телекомунікаційною мережею зв’язку

Рівень управління елементами охоплює комплекс процесів, спрямованих на контроль технічного стану обладнання, моніторинг робочих параметрів, проведення технічного обслуговування, тестування та діагностику, а також на виконання операцій із керування окремими елементами або їх групами. На цьому рівні реалізується безпосередня взаємодія з конкретними технічними засобами мережі.

Рівень мережевого управління забезпечує можливість цілісного бачення всієї телекомунікаційної інфраструктури, охоплюючи множину мережевих елементів і керуючи сукупністю їхніх ресурсів. Його основна мета полягає у забезпеченні узгодженої роботи всієї мережі, оптимізації потоків даних та підвищенні загальної ефективності функціонування системи.

Рівень управління обслуговуванням орієнтований безпосередньо на користувача. На відміну від нижчих рівнів, пов’язаних переважно з технічними аспектами мережі, цей рівень зосереджений на управлінні послугами. Тут приймаються рішення щодо надання, зміни або припинення послуг, здійснюється планування, контроль якості обслуговування, ведеться облік та аналіз споживання сервісів. Важливою метою цього рівня є гарантування стабільної якості обслуговування користувачів (QoS) відповідно до встановлених стандартів.

Рівень адміністративного управління виконує стратегічну роль, забезпечуючи загальне функціонування компанії-оператора телекомунікаційної мережі. Тут вирішуються організаційні, фінансові та кадрові питання, планується

розвиток інфраструктури, а також координується взаємодія з іншими операторами зв’язку та зовнішніми партнерами.

На сучасному етапі розвитку телекомунікаційних технологій більшість систем управління охоплює переважно рівні управління елементами або мережевий рівень, тоді як повноцінне управління обслуговуванням реалізується лише у деяких спеціалізованих рішеннях.

Функціональні можливості систем управління традиційно поділяються на *загальні* та *прикладні*.

- *Загальні функції* забезпечують підтримку роботи прикладних підсистем і охоплюють процеси передавання службової інформації між мережевими елементами та системою управління, збереження й відображення даних, сортування, фільтрацію, пошук і ведення архівів.
- *Прикладні функції*, згідно з класифікацією Міжнародної організації зі стандартизації (ISO), поділяються на п’ять основних категорій (рис. 2.2):

1. *Управління конфігурацією* — збирання, введення, оновлення та відображення даних про мережеві елементи, їх типи, розташування, ідентифікатори; організація їх увімкнення, вимкнення, зміни параметрів або фізичних з’єднань.
2. *Управління якістю роботи* — контроль основних характеристик мережі, моніторинг параметрів ефективності, збір, аналіз і реєстрація статистичних даних, виявлення тенденцій у функціонуванні мережі та її елементів, прогнозування можливих порушень у роботі.

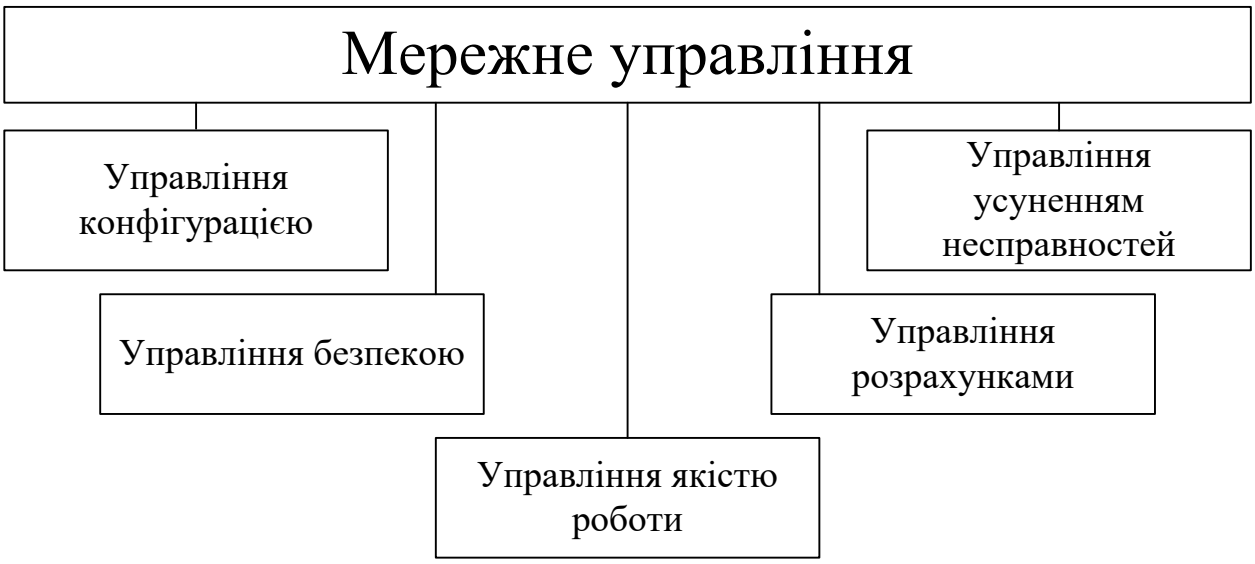


Рисунок 2.2 – Класифікація функцій мережного управління

Управління безпекою відіграє ключову роль у захисті телекомунікаційних систем від несанкціонованого втручання. До його основних завдань належать обмеження доступу до ресурсів мережі за допомогою паролів і прав користувачів, реєстрація та подання сигналів тривоги у випадку спроб порушення безпеки, блокування підозрілих або небажаних підключень, а також застосування криптографічних методів для захисту даних під час передавання.

Управління розрахунками спрямоване на моніторинг ступеня використання мережних ресурсів та забезпечення коректності нарахування плати за надані послуги. Воно дозволяє операторам контролювати навантаження на мережу, облік трафіку та ефективність використання інфраструктури.

Управління усуненням несправностей забезпечує виявлення, локалізацію, класифікацію та реєстрацію збоїв або відмов у мережі, а також надання рекомендацій щодо їх усунення. Завдяки цьому оператори отримують можливість швидко реагувати на позаштатні ситуації та мінімізувати вплив відмов на якість обслуговування користувачів.

Система управління мережами зв'язку реалізує комплекс функцій, що поділяються на **прикладні** та **загальні**.

До **прикладних функцій**, які визначають можливості управління окремими об'єктами або частинами мережі, відносяться функції, необхідні для технічного, адміністративного та експлуатаційного забезпечення:

1. Управління якістю (Performance Management — PM):

- контроль експлуатаційних показників і характеристик мережі;
- управління трафіком та забезпечення оптимального використання ресурсів;
- підтримання необхідного рівня якості обслуговування споживачів.

2. Управління відмовами (Fault Management — FM):

- аварійне сповіщення про збої;
- локалізація проблемних ділянок мережі;
- проведення тестування обладнання та сегментів мережі.

3. Управління конфігурацією (Configuration Management — CM):

- введення нових елементів у роботу для надання послуг;
- контроль і моніторинг стану мережевих елементів;
- забезпечення введення в експлуатацію обладнання та організація перемикань або змін у структурі мережі.

4. Управління розрахунками (Accounting Management — AM) – контроль тарифікації, витрат і дохідності послуг.

5. Управління захистом (Security Management — SM) – забезпечення інформаційної безпеки та цілісності системи.

До **загальних функцій**, які підтримують реалізацію всіх процесів управління, належать:

- **транспортна функція** – передача інформації між елементами TMN;
- **функція пам'яті** – збереження даних протягом заданих часових інтервалів;
- **функція захисту** – контроль цілісності та достовірності інформації;
- **функція корекції** – виявлення та виправлення помилок у даних;
- **функція обробки** – аналіз, перетворення та синтез управлінської інформації;
- **підтримка терміналів користувача** – забезпечення зручного введення й відображення даних.

Виконуючи свої завдання, система управління мережею спирається на систему технічного обслуговування, яку регламентує Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ). Основні принципи побудови TMN викладено у рекомендації ITU-T M.3010,

де визначено архітектуру та взаємодію компонентів систем управління експлуатацією мереж різного призначення: як загальнодоступних, так і корпоративних, зокрема **ISDN**. У документі також окреслено структуру управління для кінцевих пристроїв, мультиплексорів, крос-з'єднувачів, цифрових та аналогових станцій, систем передачі, сигналізаційних терміналів і мереж з комутацією каналів чи пакетів.

Серед ключових архітектурних концепцій TMN виокремлюють три основні ідеї:

1. Контрольована експлуатація – підтримання необхідної якості послуг за допомогою аналітичних методів і централізованого моніторингу з використанням еталонних параметрів.
2. Цифровізація експлуатаційних функцій – впровадження автоматизованого збору та обробки інформації про стан мережі.
3. Централізація операцій – об'єднання процесів управління у єдиному центрі для підвищення ефективності координації.

Згідно з концепцією MCE, ефективна робота мережі залежить від постійного контролю параметрів і порівняння їх із граничними значеннями. **Система** технічного обслуговування забезпечує підтримання справності обладнання, а система управління мережею відповідає за оптимальне використання всіх ресурсів і стабільність обслуговування користувачів.

Оскільки будь-яка мережа має обмежену пропускну здатність, перевищення навантаження призводить до зниження якості обслуговування, зростання кількості повторних спроб з'єднання та зменшення ефективності використання обладнання. У крайніх випадках це може викликати ефект мережевого блокування, коли більшість ресурсів зайнята службовими сигналами, а кількість успішних з'єднань різко падає.

Збільшення пропускної спроможності лише тимчасово знімає перевантаження, тому вирішальним фактором стає застосування сучасних систем управління, здатних динамічно перерозподіляти навантаження. Основна мета таких систем — мінімізувати вплив збоїв і перевантажень на міжнародному рівні.

Прикладами критичних ситуацій є пошкодження центрів комутації, планові або аварійні відключення, різке зростання кількості викликів під час надзвичайних подій чи перевантаження каналів зв'язку. Для протидії цим явищам застосовуються такі методи управління:

- використання всіх доступних з'єднувальних ліній;
- динамічний вибір маршрутів з найвищою ймовірністю успішного з'єднання;
- пріоритетне обслуговування певних типів викликів;
- обмеження перевантаження комутаційних систем.

Переваги впровадження ефективних систем управління полягають у:

- підвищенні прибутковості за рахунок збільшення кількості успішних з'єднань;
- покращенні якості обслуговування користувачів;
- раціональному використанні мережевих ресурсів;
- поглибленому аналізі стану мережі;
- забезпеченні стійкості системи до кризових ситуацій.

МСЕ наголошує, що рішення щодо застосування конкретних управлінських заходів приймає персонал експлуатаційних служб, проте останні тенденції демонструють активне впровадження систем штучного інтелекту, здатних до самонавчання та динамічної адаптації.

Відповідно до сучасних рекомендацій, децентралізовані системи управління є простішими у впровадженні й потребують меншої кількості спеціалістів, тоді як централізовані системи забезпечують кращу узгодженість рішень, повніший огляд стану мережі та вищу ефективність управління.

Однак у мережах із пакетною комутацією саме децентралізовані методи динамічного управління вважаються обов'язковими, адже без них стабільна робота таких систем є неможливою.

Концепція TMN (Telecommunication Management Network) охоплює різні типи мережевих елементів (NE) — комп'ютерні системи, бази даних, термінали, комунікаційні мережі та системи підтримки експлуатації (OSS). Вона формує єдину архітектурну структуру, що забезпечує взаємодію між усіма цими компонентами для ефективного управління мережею. У межах TMN визначено стандартизовані інтерфейси та протоколи обміну інформацією між елементами, а також описано функціональні можливості, необхідні для реалізації повноцінного мережевого управління.

В основі TMN лежать два основні об'єкти управління — **мережевий елемент (NE, Network Element)** та **система підтримки функціонування (OSS, Operations Support System)**.

Мережевий елемент (NE) — це апаратний компонент або функціональний модуль мережі, який підлягає управлінню в межах TMN. До таких елементів можуть належати як прості пристрої, так і складні інтелектуальні системи, наприклад, цифрові комутаційні станції з програмним управлінням. Вони мають власні засоби технічного обслуговування, автоматично здійснюють моніторинг працездатності, ініціюють діагностику у разі відмови, а також забезпечують дублювання критично важливих функціональних вузлів. У випадку несправності відбувається автоматичне виявлення та локалізація дефекту, після чого система самостійно блокує пошкоджений модуль та активує резервне обладнання.

Системи підтримки функціонування (OSS) становлять інший тип об'єктів управління в TMN. Під цим терміном розуміють сукупність процедур — як автоматизованих, так і виконуваних вручну — що спрямовані на забезпечення стабільної роботи мережі. До них належать системи, які:

- забезпечують взаємодію з обладнанням керування мережевими елементами;
- реалізують процедури оброблення аварійних повідомлень;
- ініціюють виконання технічних або адміністративних дій у NE;
- ведуть фінансовий облік, розрахунки та інші супровідні операції.

Взаємодія між мережевими елементами (NE) і системами OSS здійснюється за допомогою **Q-інтерфейсу**, який складається з двох частин — **інформаційної моделі** та **набору протоколів обміну**.

Інформаційна модель визначає:

• функції, що підлягають управлінню або контролю в межах конкретного мережевого елемента;

• правила створення керованих об’єктів, які формуються на основі алгоритмів роботи системи та спеціальних файлів реєстрації подій.

Таким чином, система управління мережами NGN (Next Generation Network**)** має бути побудована як комплекс технічних і програмних рішень, здатних забезпечити керування різнорідними мережами — фіксованими, мобільними, пакетними, сигнальними тощо. Вона повинна підтримувати широкий спектр послуг, працюючи з обладнанням численних виробників, зберігаючи при цьому узгодженість параметрів і стабільність функціонування.

Для реалізації ефективної системи управління NGN необхідно визначити мінімальний обсяг керуючої інформації**,** який дозволяє підтримувати потрібний рівень точності контролю параметрів мережі. Це забезпечує оптимальне співвідношення між швидкодією системи, точністю управління та навантаженням на комунікаційні ресурси.

2.4 Інформаційно-ентропійний метод розрахунку пропускної спроможності каналів системи управління

Сучасний етап розвитку глобальної цивілізації характеризується переходом людства від індустріальної до інформаційної епохи. Цей процес передбачає формування нових соціально-економічних моделей діяльності, що базуються на широкому впровадженні інформаційних та телекомунікаційних технологій у всі сфери життя. Головною метою будь-якої системи зв’язку є забезпечення максимально можливого обсягу достовірної інформації, переданої від джерела до приймача за обмежений проміжок часу.

Для досягнення необхідного рівня точності та стабільності функціонування комунікаційних процесів використовуються системи управління (СУ), що відзначаються високим рівнем складності, розвиненими функціональними можливостями, підвищеними вимогами до безпеки інформації, високою надійністю, точністю та територіальною розосередженістю.

У межах теорії інформації розглядаються закономірності, які описують процеси передавання, збереження та оброблення даних у кількісному аспекті. Особлива увага приділяється визначенню середньої швидкості передавання інформації та пошуку способів її максимізації через застосування оптимальних методів кодування. Основні співвідношення теорії інформації дозволяють оцінити ефективність функціонування телекомунікаційних систем, визначити рівень узгодженості між джерелом і каналом передавання, а також між самим каналом і кінцевим споживачем.

Одним із ключових завдань системи управління є визначення мінімально необхідного обсягу керуючої інформації**,** що гарантує підтримання заданої точності параметрів у керованій мережі. Саме тому питання оцінки пропускної спроможності каналів управління з урахуванням обсягу керуючої інформації є надзвичайно актуальним у сучасних телекомунікаційних дослідженнях.

Для вирішення цього завдання ефективним вважається інформаційно-ентропійний метод**,** який дає змогу нетрадиційними засобами визначити кількість керуючої інформації в системах управління будь-якої телекомунікаційної мережі. Застосування класичних практичних методів для цього часто ускладнене через обмеженість вхідних даних, особливо для мереж, що базуються на різнорідних технологіях. Перевага інформаційно-ентропійного підходу полягає в можливості врахування ємності керуючої інформації з урахуванням вимог до точності параметрів основної мережі.

Кількісно така оцінка базується на дисперсії відхилень контрольованих параметрів від математичного очікування: чим вищі вимоги до точності керування, тим більша повинна бути ємність керуючої інформації. Використання ентропійних принципів для опису стану контрольованих об’єктів телекомунікаційної мережі дозволяє отримати узагальнені розрахункові співвідношення, які можуть бути адаптовані для кількісного аналізу будь-якої технологічної платформи.

Суть інформаційно-ентропійного методу полягає в тому, що обсяг керуючої інформації визначається як різниця ентропії мережі до моменту активації системи управління і після встановлення нею стабільного режиму роботи. При цьому враховується кількість інформації, необхідної для підтримки стану рівноваги мережі. Нормальний режим її функціонування визначається середньоквадратичним відхиленням контрольованих параметрів від допустимих меж. Відповідно, кількість каналів і їхні параметри прямо залежать від обсягу керуючої інформації, який необхідний для досягнення оптимальної точності управління.

Реалізація інформаційно-ентропійного підходу забезпечує можливість визначення основних характеристик каналів зв’язку системи управління та гарантує необхідну точність контролю й регулювання параметрів основної телекомунікаційної мережі.

Як уже зазначалося, під час проєктування систем управління одним із ключових аспектів є визначення мінімально достатньої кількості керуючої інформації, що забезпечує необхідну точність контролю параметрів у керованому середовищі. У контексті теорії інформації процес управління мережею можна трактувати як зменшення невизначеності її стану, що кількісно відображається через зміну ентропії системи. Саме ентропія виступає мірою відхилення параметрів мережі у певний момент часу, а тому її зниження вказує на підвищення впорядкованості та ефективності функціонування телекомунікаційної системи.

2.4.1 Ентропія розподілу ймовірностей процесу управління

Розглянемо сутність запропонованого інформаційно-ентропійного методу розрахунку параметрів системи управління телекомунікаційною мережею.

Нехай процес функціонування мережі в кожний момент часу t описується вектором змінних станів $x1(t),x2(t),\ldots,xn(t)$ або функціоналом $\Phi\{x1(t),x2(t),\ldots,xn(t)\}$. Ці змінні є випадковими величинами, кожна з яких має власний закон розподілу імовірностей $p(x_i)$. Управління телекомунікаційною мережею можна трактувати як процес переведення системи зі стану невпорядкованості (початкового) у стан

оптимального функціонування, що досягається за певний проміжок часу завдяки реалізації визначених керуючих дій.

Для прикладу, якщо змінна x_i описує час доставки інформації між двома вузлами, то якість роботи мережі визначається середнім значенням затримки повідомлень, яке обчислюється як усереднене значення затримок по всіх маршрутах або вузлах. Таким чином, основним завданням системи управління є мінімізація середньої затримки передавання даних, а також зменшення її дисперсії, щоб забезпечити стабільну роботу мережі на рівні, який не перевищує заданих нормативів.

У багатьох випадках вимоги до точності управління доповнюються вимогами щодо підвищення швидкодії процесів, що відбуваються в системі. Із позиції теорії інформації, процес управління мережею можна розглядати як зменшення невизначеності її стану, тобто як зменшення ентропії системи у часі. Ентропія, у свою чергу, є мірою хаотичності або невизначеності параметрів мережі в конкретний момент часу; отже, ефективне управління передбачає поступове зниження ентропії, що свідчить про наближення системи до стану впорядкованості.

Відомо, що середня кількість інформації, яка передається сигналом, дорівнює різниці ентропій розподілу ймовірностей відповідної величини до й після отримання сигналу. Це означає, що, визначивши зміну ентропії мережі в процесі її управління, можна кількісно оцінити обсяг інформації, необхідний для досягнення заданого рівня керованості та точності зміни станів системи.

У кожний момент часу повною характеристикою стану процесу є розподіл імовірностей параметрів, які описують мережу. Для безперервних випадкових змінних, що можуть приймати значення в певних інтервалах, вводиться щільність імовірності спільного розподілу:

$$p(x1, x2,\ldots, xn) \qquad (2.1)$$

Кожна конкретна сукупність значень цих параметрів відповідає певному стану мережі. Саме через такий розподіл описується поточна конфігурація системи, її стабільність та ступінь невизначеності.

У межах теорії ймовірностей та теорії інформації поняття ентропії тісно пов’язане саме з цим розподілом імовірностей: ентропія є узагальненим показником випадковості, який дозволяє кількісно оцінити ступінь невизначеності стану системи. Таким чином, аналіз ентропії стає фундаментальною основою для визначення кількості керуючої інформації, необхідної для стабілізації параметрів телекомунікаційної мережі та забезпечення її ефективного функціонування. Ентропією безперервного розподілу ймовірностей змінних $x_1, x_2,\ldots x_n$ прийнято величину –

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} \ldots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_2,\ldots, x_n) \cdot \log p(x_1, x_2,\ldots, x_n) dx_1,\ldots, dx_n \quad (2.2)$$

Теорія інформації розглядає ентропію як характеристику розподілу ймовірностей у системах передавання та отримання інформації. У цьому контексті

передбачається, що після одержання нових даних про певну величину її ймовірнісний розподіл, а отже й ентропія, можуть зазнати істотних змін. Таким чином, ентропія в теорії інформації трактується як «суб'єктивна» або відносна характеристика, оскільки вона залежить від обсягу інформації, доступної конкретному спостерігачу. Цей різновид ентропії доцільно називати інформаційною ентропією.

Разом із нею, для опису процесів управління та взаємодії елементів мережі доцільно вводити й інше поняття — ентропію процесу. Вона є узагальненням фізичної ентропії, застосованим до керованих процесів, що описуються обмеженою кількістю координат або параметрів. Інакше кажучи, ентропія процесу характеризує розподіл ймовірностей координат, які описують стан керованої системи. Обидва типи ентропії — інформаційна та ентропія процесу — мають однаковий математичний вираз:

Ентропія розподілу ймовірностей координат керованого процесу визначається тією ж формулою, що і інформаційна ентропія (2.2).

Проте відмінність між цими поняттями полягає в їх сутності. Якщо інформаційна ентропія, як уже зазначалося, є відносною та залежить від рівня обізнаності спостерігача, то ентропія процесу, навпаки, має об'єктивний характер, не змінюючись під впливом отриманої інформації.

Іншими словами, ентропія розподілу ймовірностей координат певного процесу залишається незмінною, навіть якщо параметри інформаційної мережі вимірюються з будь-якою точністю. Для того щоб змінити ентропію процесу, необхідно здійснити активне втручання, тобто управління системою або ж вплив зовнішніх природних чинників.

Фізична ентропія при цьому є окремим випадком ентропії процесу — коли координатами виступають фізичні параметри інформаційної мережі.

Отже, можна виділити два основні типи ентропії, що мають спільну математичну основу, але різну інтерпретацію:

- інформаційну ентропію, яка є відносною та залежною від рівня отриманої інформації;
- ентропію процесу, яка виступає об'єктивною характеристикою стану системи.

Оскільки обидва поняття мають однакову математичну природу, усі властивості та співвідношення, що описують інформаційну ентропію, є справедливими і для ентропії процесу.

Якщо координати $x_1, x_2, \ldots, x_n$ незалежні, то:

$$p(x_1, x_2, \ldots, x_n) = p(x_1)\, p(x_2) \ldots p(x_n) \quad i,$$

$$\log p(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \sum_{i=1}^{n} \log p(x_i),$$

де $p(x_1), p(x_2), \ldots, p(x_n)$ - щільності розподілу ймовірностей величин $x_1, x_2, \ldots, x_n$.

Таким чином, для незалежних величин:

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} \ldots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1)p(x_2)\ldots p(x_n)\cdot\left(\sum_{i=1}^{n}\log p_i\right)dx_1, dx_2, \ldots, dx_n =$$

$$= -\int_{-\infty}^{\infty} p(x_1)\log p(x_1)dx_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} p(x_2)dx_2 \ldots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_n)dx_n -$$

$$-\int_{-\infty}^{\infty} p(x_1)dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} p(x_2)\log p(x_2)dx_2 \int_{-\infty}^{\infty} p(x_3)dx_3 \ldots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_n)dx_n -$$

$$-\int_{-\infty}^{\infty} p(x_1)dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} p(x_2)dx_2 \ldots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_{n-1})dx_{n-1} \int_{-\infty}^{\infty} p(x_n)\log x_n dx_n.$$

Але за визначенням щільності ймовірності

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x_i)dx_i = 1.$$

Тому

$$H = \sum_{i=1}^{n} H_i, \qquad (2.3)$$

де H_i - ентропія *i-ї* з незалежних величин.

Отже, ентропія незалежних параметрів процесу дорівнює сумі ентропії кожної координати.

Якщо процес характеризується лише одним параметром *x,* то ентропія:

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} p(x)\cdot\log\, p(x)dx. \qquad (2.4)$$

Якщо параметр *x* може приймати лише дискретні значення, імовірності яких дорівнюють $p_1, p_2, \ldots, p_m$, то ентропія такого параметру виражається формулою:

$$H = -\sum_{i=1}^{m} p_j \log p_j .\cdot \qquad (2.5)$$

Ця формула може бути отримана простим граничним переходом з (2.4).

Якщо дискретна величина не має відхилення, тобто значення її строго фіксоване, то всі імовірності p_j, крім однієї, рівні нулю, а ця єдина імовірність дорівнює -1. Таким чином, ентропія дискретної величини при відсутності відхилення дорівнює нулю. Це безпосередньо витікає з (2.5), де $0 \le p_j \le 1$.

Ентропія величини, яка може приймати *m* значень, як відомо, максимальна, якщо всі ці значення незалежні і рівноімовірні.

Ентропія безперервної величини заданої абсолютно точно, дорівнює негативній нескінченності.

Це положення легко довести, здійснюючи граничний перехід від розподілу ймовірностей з кінцевою дисперсією до випадку, коли дисперсія дорівнює нулю. Щільність імовірності при такому переході перетворюється в δ-функцію і ентропія прагне до -∞.

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x)\cdot\log\,\delta(x)dx = -\infty.$$

Слід зауважити, що збільшення абсолютного значення ентропії при зменшенні дисперсії (тобто зі зростанням точності вимірювання) відбувається у логарифмічній

залежності, тобто поступово, без різких змін. Перехід ентропії *H(x)* до нескінченності у випадку, коли безперервна величина ххх задана абсолютно точно, не є недоліком цього поняття як показника невизначеності. Таке явище лише підкреслює обмеженість використання ентропії у тих ситуаціях, де процес моделюється ідеалізовано — тобто передбачається можливість точної фіксації безперервних параметрів.

На практиці жодна фізична величина не може бути виміряна або зафіксована з абсолютною точністю, тому в реальних процесах ентропія ніколи не набуває нескінченного значення. Вона завжди залишається скінченною мірою невизначеності стану системи.

Крім того, для безперервних випадкових величин із заданим середнім квадратом відомо, що максимальне значення ентропії досягається тоді, коли розподіл ймовірностей має нормальний (гаусовий) характер. Це свідчить про те, що нормальний закон розподілу є найбільш «інформаційно невизначеним» серед усіх можливих при фіксованому середньому квадраті відхилення.

Для підтвердження цього положення знайдемо екстремум ентропії.

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} p(x) \cdot \log\, p(x) dx\,, \tag{2.6}$$

при умовах

$$\left.\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1; \\ &\int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx = \bar{x}^2 = \sigma^2. \end{aligned}\right\} \tag{2.7}$$

Умова екстремуму функціонала:

$$H + \lambda_1 \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx + \lambda_2 \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} (-p \log\, p + \lambda_1 p + \lambda_2 x^2 p) dx\,,$$

полягає в рівності

$$\frac{d}{dp}(-p(x) \log\, p(x) + \lambda_1 p + \lambda_2 x^2 p) = -\log\, p(x) + \lambda_1 + \lambda_2 x^2 = 0.$$

Звідки:

$$p = Ce^{\lambda_2 x^2}\,,$$

де *C=const; λ=const.*

Визначаючи *C і* λ_2 з умови (2.7), отримуємо формулу нормального розподілу ймовірностей (розподіл Гаусса):

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

Легко перевірити, що нормальний розподіл при заданих умовах відповідає саме максимуму ентропії і цей максимум дорівнює:

$$H = \log(\sigma\sqrt{2\pi e}) = \log(4{,}13\sigma). \tag{2.8}$$

Таким чином, при фіксованому середньому квадраті відхилення нормальний закон розподілу відповідає максимально можливому рівню невизначеності випадкової величини ххх серед усіх інших розподілів.

Варто підкреслити важливий момент: у практичному застосуванні головну роль відіграє не абсолютне значення ентропії, а її зміна (приріст). Це твердження можна порівняти з принципом у фізиці, де значення має не сам потенціал, а різниця потенціалів. Такий підхід усуває труднощі, пов'язані з розмірністю фізичних величин.

Дійсно, якщо випадкова величина ххх має певну фізичну розмірність, то щільність імовірності *p(x)* має обернену розмірність. Унаслідок цього, під знаком логарифма у виразі для ентропії з'являється величина з розмірністю, що може спричинити методологічні незручності. Проте у випадку обчислення різниці ентропій у виразі залишається логарифм від безрозмірного відношення, і всі одиниці виміру скорочуються. Це положення чітко ілюструється у формулі (2.9). Різниця ентропій двох станів, що мають нормальні розподіли і середні квадрати σ_1^2, σ_2^2, дорівнює:

$$H_2 - H_1 = \log(\sigma_2\sqrt{2\pi e}) - \log(\sigma_1\sqrt{2\pi e}) = \log\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -\log\frac{\sigma_1}{\sigma_2}. \qquad (2.9)$$

Використання поняття ентропії, звісно, не може замінити детальний аналіз процесів керування взаємодією елементів інформаційної мережі. Однак саме через призму ентропійного підходу можна визначити загальні принципи та умови ефективної організації системи управління такими процесами.

2.4.2 Ентропія в замкнених системах управління

Нехай стан процесу функціонування мережі в кожний момент часу визначається сукупністю змінних *x1,x2,…,xn*, які далі називатимемо координатами процесу. Ці координати, як правило, мають відхилення від бажаних (оптимальних) значень, тобто містять випадкові складові.

Одним із головних завдань управління функціонуванням інформаційної мережі є мінімізація відхилень поточного стану процесу від бажаного. При цьому зі зростанням вимог до якості функціонування підвищується і вимога до точності управління.

Слід зазначити, що в літературі з теорії інформації отримання відомостей про певний процес часто ототожнюється зі зміною ентропії цього процесу**.** Нагадаємо**,** що приріст ентропії стану процесу відображає ступінь відхилення його фактичного перебігу від бажаного. Відповідно, зміна ентропії процесу є об'єктивною характеристикою, яка не може бути досягнута лише шляхом спостереження або вимірювання, тобто простим «відображенням» процесу.

Для того щоб змінити ентропію в означеному сенсі, необхідне активне втручання в перебіг процесу, тобто керуючий вплив. Отже, отримання певного обсягу інформації про процес є необхідною, але недостатньою умовою для реалізації ефективного управління.

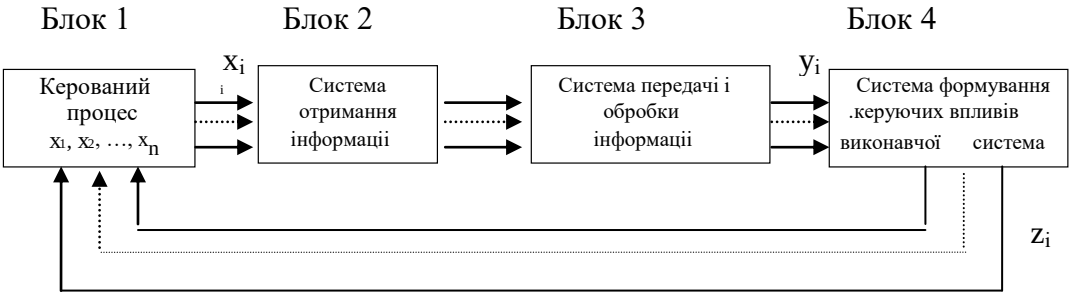


Рисунок 2.3– Замкнена схема процесу управління

На рисунку 2.3 представлено замкнену схему процесу управління.

Інформація про керований процес (блок 1), тобто координати X_i, надходить до системи отримання інформації (блок 2). Отримані дані передаються до системи передачі й оброблення інформації (блок 3), де вони аналізуються та перетворюються відповідно до заданих алгоритмів.

Після оброблення інформація спрямовується до системи формування керуючих впливів Z_i, або виконавчої системи (блок 4). У результаті сформовані керуючі сигнали X_i впливають на керований процес у напрямку зменшення ентропії, тобто підвищення впорядкованості та стабільності функціонування мережі.

Під час аналізу процесів передачі та перетворення інформації величини *x1, x2,…, xn* розглядаються як вхідні параметри системи отримання і перетворення інформації, тоді як *y1,y2,…,yn* є вихідними параметрами цієї системи. Відповідно, кількість переданої та перетвореної інформації визначається логарифмом відношення щільностей імовірностей вхідних і вихідних величин після отримання сигналу на виході.

Кількість інформації залежить від взаємозв'язку між вхідними та вихідними параметрами. Для загального опису процесу передачі та перетворення інформації доцільно використовувати математичне сподівання, тобто середню кількість інформації при передачі однієї величини $x \to y$, що визначається виразом:

$$I = M[H(x)] - M_y[H_y(x)]. \qquad (2.10)$$

Величина $M_y[H_y(x)]$ є усередненою характеристикою впливу завад і затримок, що виникають під час передавання сигналу.

Таким чином, середня кількість інформації при передачі x→yx \rightarrow yx→y дорівнює різниці ентропій розподілу ймовірностей вхідної величини до отримання сигналу та усередненої ентропії цієї ж величини після його прийому.

Слід зазначити, що у разі нормального розподілу ймовірностей вхідних і вихідних величин середню кількість переданої інформації можна виразити через коефіцієнт кореляції zzz між вхідною та вихідною величинами.

Зазначимо, що величини $x_1, x_2, \ldots, x_n$ так само як і величини $y_1, y_2, \ldots, y_n$ розглядаємо як компоненти *n-мірних* векторів і передаання $x_1, x_2, \ldots, x_n \to y_1, y_2, \ldots, y_n$ можна називати передаванням *n-ого* вектора $x \to y$.

Раніше, ніж записати відповідні вирази, пояснимо поняття кореляційної матриці і кореляційного визначника випадкового вектора. Кореляційні моменти є математичні очікування відхилень випадкових величин:

$$\begin{aligned} R_{\gamma\mu}^{xx} &= M[(x_\gamma - m_{x\gamma})(x_\mu - m_{x\mu})]; \\ R_{\gamma\mu}^{xy} &= M[(x_\gamma - m_{x\gamma})(y_\mu - m_{y\mu})]; \\ R_{\gamma\mu}^{yy} &= M[(y_\gamma - m_{y\gamma})(y_\mu - m_{y\mu})]. \end{aligned} \tag{2.11}$$

Матриці, складені з кореляційних моментів, називаються кореляційними матрицями, а визначники, відповідні цим матрицям, іменуються кореляційними визначниками.

Можна показати, що ентропія випадкового вектора *x*, яка має нормальний закон розподілу, дорівнює:

$$H(x) = \log\sqrt{(2\pi e)^n \left|R^{xx}\right|}, \tag{2.12}$$

де $|\boldsymbol{R}^{xx}|$ - кореляційний визначник даного вектора.

Математичне очікування кількості інформації при передачі вектора $x \to y$ при нормальному розподілі вхідних і вихідних величин:

$$I = -\frac{1}{2}\log\frac{|R|}{\left|R^{xx}\right|\cdot\left|R^{yy}\right|}. \tag{2.13}$$

Якщо вихідний вектор не залежить від вхідного, то $R_{\gamma\mu}^{xy} = 0$, $|R| = |R^{xx}| \cdot |R^{xy}|$, і кількість інформації дорівнює нулю: *I=0***.** Для одномірного випадку:

$$|R^{xx}| = R_{11}^{xx} = \sigma_x^2; \quad |R^{yy}| = R_{11}^{yy} = \sigma_y^2;$$
$$|R| = \begin{vmatrix} R_{11}^{xx} & R_{11}^{xy} \\ R_{11}^{xy} & R_{11}^{yy} \end{vmatrix} = R_{11}^{xx} - R_{11}^{yy} - (R_{11}^{xy})^2$$

і вираз (2.13) можна представити у вигляді:

$$I = -\frac{1}{2}\log(1 - r^2),$$

де $r = \dfrac{R_{11}^{xy}}{\sigma_x \sigma_x}$.

При розгляді понять передачі інформації в системах управління, необхідно проаналізувати інформаційні процеси при перетворенні координат і втрати інформації при проходженні сигналу через послідовно ввімкнені системи.

У системах отримання передачі і обробки інформації (рис. 2.3) часто здійснюється перетворення координат. Перетворення координат:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, \ldots, x_n),$$
$$y_2 = f_2(x_1, x_2, \ldots, x_n),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$y_n = f_n(x_1, x_2, \ldots, x_n)$$

називається взаємно однозначним, якщо перетворення

$$\frac{D(y_1, y_2, \ldots, y_n)}{D(x_1, x_2, \ldots, x_n)} = \begin{vmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \frac{df_1}{dx_2} & \ldots\ldots & \frac{df_1}{dx_n} \\ \frac{df_2}{dx_1} & \frac{df_2}{dx_2} & \ldots\ldots & \frac{df_2}{dx_n} \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots \\ \frac{df_n}{dx_1} & \frac{df_n}{dx_2} & \ldots\ldots & \frac{df_n}{dx_n} \end{vmatrix}$$

відмінне від нуля. Тут $f_1, f_2, \ldots, f_n$ - деякі функції, що диференціюються.

Варто зазначити, що середня кількість переданої інформації не змінюється у разі взаємно однозначного перетворення координат. Це означає, що за умови збереження однозначної відповідності між вхідними та вихідними параметрами системи кількість інформації залишається сталою.

Передавання інформації здійснюється послідовно — від системи отримання інформації до системи її передачі, далі до системи оброблення та, зрештою, до виконавчої системи. При цьому система передачі, обробки інформації та виконавча система не зазнають прямого впливу з боку керованого процесу, оскільки передбачається лише односпрямована дія керуючих координат ziz_izi на об'єкт управління.

У разі, якщо керований процес здійснює безпосередній зворотний вплив на керуючі координати або виконавчу систему, цей вплив можна розглядати як додаткову інформацію, що надходить до системи отримання даних. Таким чином, зворотний зв'язок фактично стає частиною каналу інформаційного обміну.

Середня кількість інформації під час проходження через послідовно з'єднані системи може лише зменшуватися або, в граничному випадку, залишатися незмінною — якщо відсутні додаткові шуми, завади чи втрати даних у процесі передавання:

$$I_{xz} \le I_{xy},$$

де $I_{xz} = M[H(x)] - M_z[H_z(x)]$ - середня кількість інформації при передачі $x \to y \to z$;

$I_{xy} = M[H(x)] - M_y[H_y(x)]$ - середня кількість інформації при передачі $x \to y$.

Авжеж, в теорії інформації розглядається передача інформації через розімкнені системи. Для процесів управління притаманні замкнені контури циркуляції інформації.

Розглянемо загальну схему процесу управління, представлену на рис.3.1.

Відзначимо, що модель системи такого типу є адаптивною і відповідно, практично обробляє усі плинні прогнозовані збурення, які впливають на *виконавчу* систему.

Контур циркуляції в даній системі можна подати у вигляді:

$x \to y \to z \to x$ *або* $x \to z \to x$.

Розглянемо випадок, коли контур системи управління розмикається в певній точці, наприклад, у місці з'єднання вимірювальної системи (системи отримання інформації) з керованим процесом (об'єктом). Іншими словами, припинимо надходження інформації від керованого процесу до вимірювальної системи.

Якщо на вхід вимірювальної системи подати інформацію з зовнішнього джерела — тобто задати деяке значення *x*, — то після проходження цього сигналу через усі елементи системи управління та сам керований об'єкт на виході отримаємо певне значення x′.

Отже, у розімкненій системі відбувається передача інформації типу $x \rightarrow x'$, де результат x′ є відображенням реакції керованого об'єкта на подану ззовні вхідну інформацію. Такий підхід дозволяє досліджувати властивості системи управління, її чутливість до вхідних сигналів, а також оцінити якість передавання та перетворення інформації в межах системи.

Як відомо з основних співвідношень теорії інформації, кількість інформації при передачі $x \rightarrow x'$ дорівнює:

$$I = M[H(x)] - M_x[H_x(x')], \tag{2.14}$$

де $H(x)$ - ентропія x,

$M_x[H_x(x')]$ - усереднене за x значення ентропії після отримання сигналу x'.

Для скорочення запису використані позначення:

$H(x_1, x_2, \ldots, x_n) = H(x)$,

де $x_1, x_2, \ldots, x_n$ - координати (параметри) керованого процесу.

Співвідношення (2.14) можна представити у вигляді

$$I = H(x) - H_x(x') + S, \tag{2.15}$$

де $S = M[H(x)] - M_x[H_x(x')]$.

Величина S називається приростом ентропії приведених шумів. Величина $H_x(x')$ є ентропією координат на виході (ентропія процесу) при заданому сигналі x на вході. Ця ентропія має кінцеву величину внаслідок впливу різного роду похибок і завад, причому вона відображає сумарний ефект дії похибок і завад вимірювачів, системи передачі і перетворення інформації, виконавчої системи, а також збурюючих сил безпосередньо на керований процес. Дія цих завад, ніби приведена до виходу контуру - керованим координатам x'. Член $M_x[Hx(x')]$ – це та ж величина, усереднена за вхідною величиною x.

Таким чином, приріст ентропії приведених завад S є різниця ентропії завад, приведених до виходу, і тієї ж ентропії, усередненої за вхідними величинами.

Якщо замкнути контур дискретного управління, то на вхід сприймаючої системи будуть впливати координати керованого процесу в деякий момент часу $t-1$, а величиною x' будуть координати того ж керованого процесу в момент часу t, то величини x та x будуть мати:

$x = x(t-1); x' = x(t)$.

Величини $H(x')$ і $H_x(x')$ при замкненому контурі дискретного управління звертаються до значень ентропії керованого процесу відповідно в $(t-1)$-й і t-й моменти часу.

Рівняння (2.15) приймає вигляд:

$$I(t) = H(t-1) - H(t) + S(t),$$

або

$$H(t) - H(t-1) = S(t) - I(t), \qquad (2.16)$$

де *H(t-1) і H(t)* - значення ентропії керованого процесу відповідно в *(t-1)-й і t-й* моменти часу;

I(t) - кількість інформації, передана за відповідний інтервал часу від джерела до одержувача (яким є той же керований процес).

Отже, приріст ентропії, керованого дискретним чином процесу, за інтервал дискретності дорівнює різниці приросту ентропії приведених завад і кількості інформації, переданої в замкненому контурі *(x(t-1)→x(t))* за той же інтервал часу. Позначимо індексом *0* початковий момент часу і з співвідношення (2.13), знаходимо:

$$H(t) = H(0) - \sum_{i=0}^{t} I(i) + \sum_{i=0}^{t} S(i). \qquad (2.17)$$

Ентропія процесу, який керується дискретним способом, визначається як різниця між початковою ентропією цього процесу, збільшеною на сумарний приріст ентропії завад, та сумарною кількістю інформації, що передається через контур управління *(x(t−1)→x(t))*.

У випадку стаціонарного процесу виконується рівність *H(t) = H(t−1)*, а отже, *S(t)=I(t)*. Це означає, що для підтримання стаціонарного режиму роботи керованого процесу необхідно, щоб кількість інформації, переданої через контур управління протягом одного інтервалу дискретності, дорівнювала приросту ентропії, спричиненому дією завад.

Для некерованого процесу кількість переданої інформації I(t) дорівнює нулю, тому *H(t) – H(t−1) = S(t)*. Це свідчить про те, що приріст ентропії завад у такому випадку повністю відповідає приросту ентропії самого процесу за той самий проміжок часу.

Таким чином, для ефективного управління процесом функціонування інформаційної мережі необхідно в кожному інтервалі дискретності передавати таку кількість управляючої інформації, яка компенсує сумарний приріст ентропії некерованого процесу і забезпечує необхідне зменшення ентропії функціонування мережі за відповідний часовий інтервал.

У загальному випадку, якщо процес характеризується вектором *{X1(t),X2(t),…Xn(t)},*то ентропія дорівнює:

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_2, \dots, x_n) \cdot \log p(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, \dots, dx_n .$$

Оскільки важко визначити заздалегідь реальний закон розподілу *p(x),* зробимо припущення, що *p(x)* має нормальний закон розподілу. У цьому випадку ентропія, як відомо, визначається як: $H = \log (4{,}13\sigma)$.

Таким чином, приріст (зменшення) ентропії в (3.16) буде визначатися як:

$$H(t) - H(t\text{-}1) = \log\frac{\sigma_1(t)}{\sigma_1(t-1)} + \ldots \log\frac{\sigma_n(t)}{\sigma_n(t-1)}, \qquad (3.18)$$

і для оцінки кількості інформації, яка передається в системі управління мережею, ми повинні оцінити відношення дисперсій відхилення параметрів повідомлень, що досліджуються в мережі в різних ситуаціях, а така оцінка може бути зроблена за вимогами до параметрів основної мережі.

2.4.3 Ентропія та інформація в розімкнених системах управління

Як відомо, складні системи зазвичай піддаються впливу випадкових, різко змінюваних збурень. У таких умовах система управління повинна забезпечувати необхідну точність параметрів функціонування мережі, незважаючи на стохастичний характер зовнішніх впливів. Системи, які зберігають сталість своїх параметрів і здатні підтримувати ефективність управління за наявності таких збурень, називаються інваріантними.

Отже, на схемі (рис. 2.4) блок 1 відображає джерело стохастичних збурень, блоки 2, 3 і 4 представляють елементи системи управління — систему отримання, передачі й обробки інформації, а також виконавчу систему. Блок 5 відповідає керованому процесу, тобто самій інформаційній мережі, на яку спрямоване управління. Скорочено цей контур може бути представлений у вигляді:

$X \rightarrow Y \rightarrow Z$

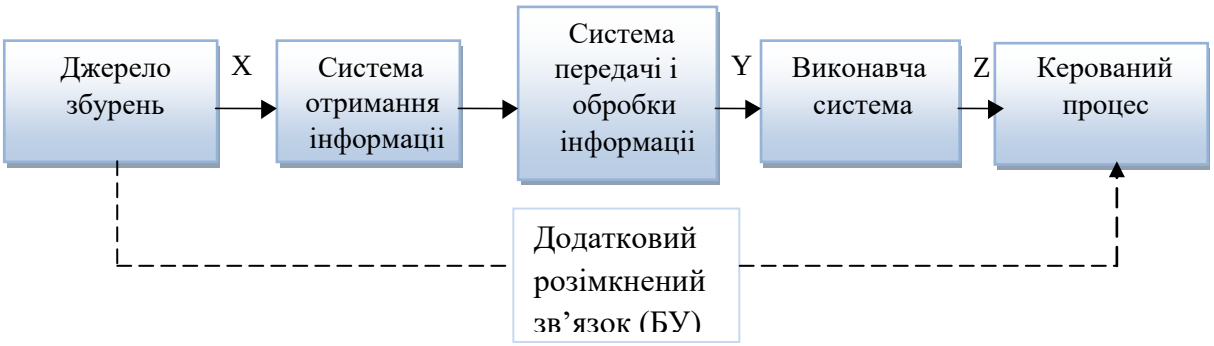


Рисунок 2.4 – Інваріантна система управління в розімкнутому вигляді

Як відомо, технічна реалізація абсолютно інваріантних систем є вкрай складною. Такі системи доцільно розглядати як граничні випадки, до яких прагнуть у процесі розробки, але повного досягнення яких практично неможливо. Тому на практиці зазвичай реалізується часткова інваріантність або інваріантність до деякої похибки ε.

Системою, інваріантною до ε, називають таку систему, у якій зберігаються основні властивості абсолютно інваріантної системи, але при цьому існує динамічна похибка σ, що характеризує ступінь відхилення від повної інваріантності.

Згідно з основними положеннями теорії інформації, можна визначити абсолютно інваріантну систему, яка відрізняється від вихідної наявністю динамічної похибки σ за умови максимально необхідної кількості інформації ΔH. Порівнюючи

такі системи для однієї й тієї самої множини вхідних сигналів, можна отримати кількісну оцінку інваріантності. При цьому ΔH виступає мірою ε-інваріантності для даного типу множини вхідних сигналів.

Використовуючи оцінки інваріантності до ε, отримаємо вираз, який визначає необхідну кількість інформації ΔH:

$$\Delta H = K(\log \frac{\sigma_1}{\overline{\sigma}_1} + \log \frac{\sigma_2}{\overline{\sigma}_2} + ... + \log \frac{\sigma_n}{\overline{\sigma}_n}), \qquad (2.19)$$

де σ_i - можливі середньоквадратичні відхилення параметрів інформаційної мережі, що контролюються, від необхідних значень;

$\overline{\sigma}_i$ - середньоквадратична допустима похибка параметрів інформаційної мережі, що контролюються, від необхідних значень;

$i=1, 2, ..., n;$

K - коефіцієнт, який залежить від типу каналу зв'язку, що використовується.

Необхідно зазначити, що система управління інформаційною мережею повинна поєднувати здатність адаптуватися до стійких та поступових змін режимів роботи із властивістю інваріантності, яка забезпечує нечутливість до випадкових збурень. Тому оптимальна система управління має комбіновану структуру, що включає як адаптивну (замкнену), так і інваріантну (розімкнену) підсистеми. Схематичне зображення такої системи наведено на рис. 2.5, де БУ позначає блок узгодження.

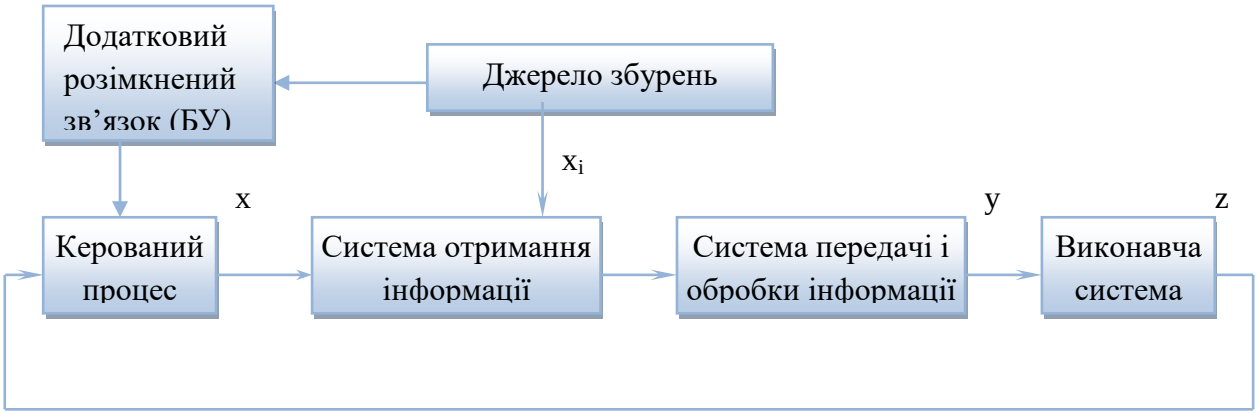


Рисунок 2.5 – Структура комбінованої системи управління

Середня кількість інформації, яку необхідно передавати в системі управління, визначається сумою виразів (2.18) та (2.19). Це дозволяє одночасно забезпечити адаптивність і інваріантність системи.

Запропонований підхід дає змогу визначити мінімально необхідний обсяг інформації, за якого параметри мережі підтримуються із заданою точністю. Якщо кількість інформації в системі управління буде меншою, точність параметрів відповідно знизиться. З точки зору теорії інформації та динамічної точності, доцільно, щоб система управління забезпечувала задану точність параметрів мережі при мінімально можливому обсязі керуючої інформації.

Отже, серед двох систем управління перевага надається тій, яка потребує меншої кількості керуючої інформації, оскільки це знижує вимоги до якості каналів передавання даних, що використовуються системою управління.

Інформаційно-ентропійний метод дозволяє нетрадиційним способом визначати кількість керуючої інформації в системі управління будь-якою телекомунікаційною мережею. Така оцінка практично недосяжна іншими методами через обмежену кількість вихідних даних, особливо для мереж, у яких використовуються різні технології. Практична цінність методу полягає у можливості врахування ємності керуючої інформації відповідно до вимог до точності параметрів основної мережі. Ця оцінка базується на аналізі дисперсії відхилення параметрів від їх математичного очікування: чим вищі вимоги до точності, тим більшою має бути ємність керуючої інформації.

Комбінована система управління (рис. 2.5) забезпечує можливість функціонування телекомунікаційної мережі у двох режимах, поєднуючи властивості адаптивності та інваріантності її параметрів.

Перший режим — **адаптивний** — використовується у більшості систем управління. Він полягає у контролі параметрів телекомунікаційної мережі та прийнятті на цій основі рішень, що відображено на рис. 2.3.

Другий режим — **розімкнений** — призначений для попередження та усунення аварійних ситуацій. У цьому випадку система аналізує прогнозовані збурювальні фактори й виконує коригування параметрів мережі (рис. 2.4).

Нарешті, **комбінована структура** (рис. 2.5) дає змогу реалізувати обидва режими одночасно. Кількість інформації, яка передається та обробляється системою управління, визначає не лише основні властивості керованої телекомунікаційної мережі, але й формує її структуру та функціональні особливості.

3 РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ УПРАВЛЯЮЧОЇ ІНФОРМАЦІЇ

3.1 Взаємна інформація

Ентропія ансамблю відображає середню кількість повної інформації, яка міститься в повідомленні. Тепер розглянемо інформацію, що міститься в одному ансамблі відносно іншого — наприклад, у прийнятому сигналі відносно переданого повідомлення.

Для цього проаналізуємо об’єднання двох взаємозалежних дискретних ансамблів *A* і *B*. Таке поєднання можна інтерпретувати кількома способами: як пару ансамблів повідомлень; як ансамбль повідомлень і ансамбль сигналів, за допомогою яких ці повідомлення передаються; або як ансамблі сигналів, що відповідають вхідним і вихідним даним каналу зв’язку.

Таким чином, спільний розгляд двох ансамблів дозволяє оцінити кількість інформації, що передається від одного до іншого, а також визначити ступінь залежності між ними, що є основою для аналізу ефективності процесів передачі даних у телекомунікаційних системах. Нехай $P(a_k, b_l)$ - спільна вірогідність реалізацій a_k та a_l. Спільною ентропією ансамблів *A* і *B* називатимемо

$$H(A,B) = M\left\{\log \frac{1}{P(a_k, b_l)}\right\}. \qquad (3.1)$$

Введемо також поняття умовної ентропії

$$H(A|B) = M\{\log [1/P(a_k|b_l)]\},$$

де $P(a_k, b_l)$ – умовна вірогідність a_k, якщо має місце b_l; тут математичні очікування беруться по об'єднаному ансамблю AB. Зокрема, для джерел без пам'яті

$$H(A|B) = \sum_k \sum_l P(a_k, b_l) \log [1/P(a_k|b_l)].$$

З теореми множення імовірностей $P(a, b) = P(a)\, P(b|a) = P(b)\, P(a|b)$ виходить, що

$$H(A,B) = H(A) + H(B|A) = H(B)\, H(A|B).$$

Для умовної ентропії справедлива подвійна нерівність:

$$0 \le H(B|A) \le H(A). \qquad (3.3)$$

При цьому рівність $H(A|B)=0$, як видно з (3.2), має місце у тому випадку, коли при кожному значенні b_l, умовна вірогідність однієї реалізації $P(a_i \mid b_l)= l$, а для решти всіх реалізацій $P(a_k \mid b_l)= 0$. Це означає, що, знаючи реалізацію *B*, можна точно встановити реалізацію *A*. Іншими словами, *B* містить повну інформацію про *A*.

Інший крайній випадок, коли $H(A|B)=H(A)$, має місце, якщо $P(a_k|b_l) = P(a_k)$ при всіх a та b. Остання рівність означає, що події A і B незалежні. В цьому випадку знання реалізації B не зменшує невизначеності A, тобто В не містить жодної інформації про А.

У загальному випадку умовна ентропія $H(A \mid B)$ менше безумовної $H(A)$ і знання реалізації B знижує в середньому первинну невизначеність A. Природно назвати різницю $H(A) - H(A \mid B)$ вважати кількістю інформації, що міститься у B відносно A. Її називають також взаємною інформацією між A і B і позначають $I(A, B)$:

$$I(A, B)= H(A) - H(A \mid B). \tag{3.6}$$

Виразимо взаємну інформацію через розподіли вірогідності:

$$I(A,B) = M\left\{\log\frac{1}{P(a_k)}\right\} - M\left\{\log\frac{1}{P(a_k|b_l)}\right\} = M\left\{\log\frac{P(a_k|b_l)}{P(a_k)}\right\} \tag{3.7}$$

Якщо скористатися теоремою множення $P(a_k, b_l) = P(b)\, P(a_k \mid b_l)$, то можна записати $I(A, B)$ в симетричній формі:

$$I(A,B) = M\left\{\log\frac{P(a_k, b_l)}{P(a_k)P(b_l)}\right\}. \tag{3.8}$$

Сформулюємо основні властивості взаємної інформації:

1. $I(A, B)>0$,

причому рівність має місце тоді і лише тоді, коли A і B незалежні між собою. Це витікає з визначення (3.6) і нерівності (3.5).

2. $I(A, B) = 1(B, A)$

тобто B містить стільки ж інформації відносно A, скільки A містить відносно В. Ця властивість витікає з симетрії вираження (3.8). Тому можна також записати

$$I(A, B)= H(B) – H (B \mid A).$$

3. $I(A, B) \le H(A)$,

причому рівність має місце, коли по реалізації B можна однозначно відновити A. Це виходить з (3. 5) і (3.6).

4. $I(A, B) \le H(B)$,

причому рівність має місце, коли по реалізації A можна точно встановити реалізацію B.

5. Вважаючи в (3.6) $B=A$ і враховуючи, що $H(A| A)=0$, отримаємо

$H(A, A) = H(A)$.

Це дозволяє інтерпретувати ентропію джерела як його власну інформацію, тобто інформацію, що міститься в ансамблі A про самого себе.

Хай, наприклад, A - ансамбль дискретних повідомлень, а B - ансамбль дискретних сигналів, в які перетворяться повідомлення A. Тоді $I(A, B)= H(A)$ в тому і лише у тому випадку, коли перетворення $A \to B$ зворотне. При необоротному перетворенні $1(A, B) < H(A)$ і різниця $H(A) – I(A, B) = H(A|B)$ можна назвати втратою

інформації при перетворенні. Її називають також *ненадійністю.* Таким чином, інформація не втрачається лише при зворотніх перетвореннях.

Якщо T - середній час передачі одного повідомлення, то, розділивши вищенаведені формули на T і позначивши

$$H`(B \mid A) = \frac{1}{T} H(B \mid A), \qquad I`(A, B) = \frac{1}{T} I(A, B)$$

і т. д., отримаємо відповідну рівність для ентропії і кількості інформації, розрахованих не на одне повідомлення, а на одиницю часу. Величина $I'(A, B)$ називається швидкістю передачі інформації від А до В (або навпаки).

Якщо, наприклад, U - ансамбль сигналів на вході дискретного каналу, а Z - ансамбль сигналів на його виході, то швидкість передачі інформації по каналу виразиться наступним чином:

$$I`(U, Z) = H`(U) - H`(U \mid Z) = H`(Z) - H`(Z \mid U).$$

Ці співвідношення наочно ілюструються на рис. 2.6.

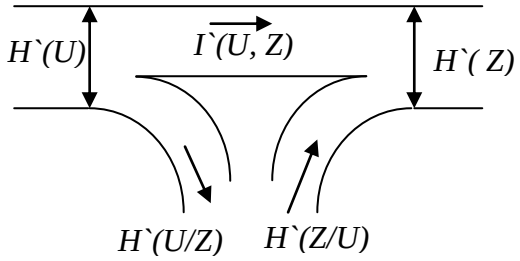


Рисунок 2.6 – Ілюстрація передачі інформації по каналу з завадами

Позначимо, що $H'(U)$ — це продуктивність джерела сигналу, тобто кількість інформації, яка генерується повідомленням U за одиницю часу. Величина $H'(Z)$ відображає «продуктивність» каналу зв'язку, тобто повну власну інформацію, що міститься у прийнятому сигналі за той самий проміжок часу.

Показник $H'(U|Z)$ характеризує швидкість «просочування» інформації, тобто втрату частини корисного змісту при проходженні сигналу через канал. У свою чергу, $H'(Z|U)$ відображає швидкість передачі сторонньої інформації, яка не має відношення до повідомлення U та виникає через вплив перешкод у каналі зв'язку.

Співвідношення між $H'(U|Z)$ і $H'(Z|U)$ визначається властивостями самого каналу. Наприклад, якщо телефонний сигнал передається через канал із вузькою смугою пропускання, якої недостатньо для повного відтворення звуку, але при цьому рівень шумів невеликий, то частина корисної інформації втрачається, однак стороння інформація майже не з'являється. У цьому випадку виконується нерівність $H'(U|Z) \leq H'(Z|U)$.

І навпаки, якщо сигнал передається з високою якістю, але в паузах між словами чутні наведення з інших телефонних ліній, то, хоча втрати корисної інформації мінімальні, у каналі з'являється значна кількість додаткової, небажаної інформації. У такій ситуації спостерігається $H'(U|Z) \geq H'(Z|U)$.

3.2 Розрахунок інформаційних потоків в системі управління з урахуванням кореляційних зв'язків та взаємної інформації

Система управління повинна вибрати певну дію з множини можливих варіантів, щоб найрезультативніше досягти поставлених цілей. Унаслідок здійснення цього вибору невизначеність початкової множини зменшується на величину інформації, що виникає під час самого акту прийняття рішення. Таким чином, положення теорії інформації можуть бути використані не лише для визначення стану об'єкта керування, а й для вибору оптимальних керуючих дій.

Проблему вибору найдоцільнішої дії в межах теорії інформації можна сформулювати так: маючи інформаційну модель об'єкта і знаючи його бажаний стан, необхідно знайти такі вхідні параметри, які з урахуванням наявних умов, попереднього досвіду та впливу середовища забезпечать найефективніше переведення системи у цільовий стан, що визначається вихідними параметрами.

Побудова аналітичної моделі системи керування ускладнюється браком наперед відомих даних про сам об'єкт, а також обмеженнями та складністю математичного апарату, який може бути застосований для його опису. Зміна стану одного з елементів мережі, що є частиною загальної структури, може призвести до змін у різних її ділянках і на різних рівнях. Відмова одного компонента іноді спричиняє лавину повідомлень про помилки різних типів і форматів, які надходять з різних вузлів мережі.

Система керування має забезпечити автоматичний збір таких даних і враховувати їх взаємозв'язок, базуючись не лише на описі стану окремих елементів, а й на аналізі зв'язків між ними. Зміна стану будь-якого параметра мережі означає появу певної події, тобто інформаційного повідомлення. Тому взаємодію елементів можна розглядати як кореляцію подій, що передбачає відсіювання другорядних сигналів, виявлення причинно-наслідкових залежностей між рештою повідомлень, виокремлення тривожних сигналів та визначення тієї події, яка стала джерелом зміни стану системи.

Отже, для побудови оптимальної системи керування необхідно оцінити кореляційні характеристики об'єктів і параметрів, а також визначити кількість керуючої інформації, що циркулює в системі.

Поняття ентропії в цьому випадку уточнюють, враховуючи залежність між параметрами. Якщо відхилення одного параметра перевищує допустиме значення і водночас пов'язане зі зміною іншого, то між ними існує кореляційний зв'язок. Ентропія як міра невизначеності або розсіювання подібна до дисперсії, проте має універсальніший характер. Дисперсія правильно описує розсіяння лише для певних (зокрема нормальних) розподілів випадкових величин, тоді як ентропія не залежить від форми розподілу. Міру невизначеності f прийнято вважати зростаючою із

збільшенням кількості можливих результатів і такою, що є адитивною, тобто для двох незалежних експериментів виконується співвідношення *f(nm) = f(n) + f(m)*. Саме така зручна міра невизначеності запропонована К. Шенноном:

$$H(X) = -P(X_i)\log_{\mathbf{g}} P(X_i) \qquad (3.9)$$

де X — дискретна випадкова величина з діапазоном змінювання *N;*

$P(X_i)$ — імовірність *i-го* стану *X*.

У межах теорії інформації поняття ентропії розглядається як міра невизначеності стану системи до моменту передавання повідомлення, оскільки заздалегідь неможливо передбачити, яке саме повідомлення з множини можливих буде обране джерелом. Чим вища ентропія, тим більша невизначеність системи та тим більший обсяг інформації міститься в одному повідомленні.

Значення ентропії обмежується інтервалом

$$0 \le H(X) \le \log N.$$

Нижня межа відповідає випадку повністю визначеного (виродженого) розподілу, коли випадкова величина *X* не змінюється і має єдине значення, тобто $X_j = const$. Верхня межа характеризує рівномірний розподіл, за якого всі *N* можливих значень Xi мають однакову ймовірність появи.

Якщо всі події або повідомлення є рівноймовірними, то зі збільшенням кількості можливих подій *m*, які утворюють повну групу, зростає і невизначеність системи, тобто ентропія також збільшується.

Коли всі повідомлення рівноймовірні *[$P(a_i) = 1/m$]* **,** ентропія системи

$$H(a) = -\sum_{i=1}^{m} [\![P(a]\!]_i) \log [\![P(a]\!]_i) = -m\frac{1}{m}\log\left(\frac{1}{m}\right) = \log m$$

збільшується за логарифмічним законом.

Якщо ймовірність будь-якого повідомлення дорівнює одиниці *[$P(a_i) = 1$]*, то ентропія скінченної системи дорівнює нулеві.

Враховуючи, що $\sum_{i=1}^{m} [\![P(a]\!]_i) = 1,$ одержуємо

$$H(a) = -1[1 \cdot \log 1 + (m+1) \cdot 0 \cdot \log 0].$$

Очевидно, що $1 \cdot \log 1 = 0$, оскільки log 1 = 0. Добуток $0 \cdot \log 0$ є невизначеністю типу 0·(-∞) , тому що log0 = $-\infty$. Ця невизначеність дорівнює нулеві.

Отже, при $P(a_i) = 0$ ентропія системи повідомлень *H(a)* дорівнює нулеві.

Невизначеність повної системи рівноймовірних повідомлень при даному *m* максимальна. Доведення цієї властивості в загальному вигляді є досить складним. Тому обмежимося прикладом, коли *m = 2*. При цьому

$$\sum_{i=1}^{2} [\![P(a]\!]_1); \quad [\![P(a]\!]_1) = P; \quad [\![P(a]\!]_2) = 1 - P;$$

$$H(a) = -P \log P - (1-P)\log(1-P).$$

Ентропія скінченної системи, що складається з двох подій, досягає свого максимального значення, яке дорівнює одиниці при P = 0.5, тобто при однаковій імовірності подій, оскільки $(1-P) = 1-0.5 = 0.5$.

Ентропія має властивість адитивності, тобто невизначеність об'єднаної системи подій дорівнює сумі ентропій незалежних скінчених систем подій, що складають цю систему.

Розглянемо такі дві незалежні повні системи подій:

$$a = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \dots . & a_n \\ P_1 & P_2 \dots . & P_n \end{pmatrix}; \quad b = \begin{pmatrix} b_1 & b_2 \dots . & b_m \\ q_1 & q_2 \dots . & q_m \end{pmatrix},$$

де P_i, q_i – імовірності подій a і b відповідно.

Ентропія цих скінченних систем подій

$$H(a) = -\sum_{i=1}^{n} P_i log P_i ; \quad H(a) = -\sum_{i=1}^{m} q_i \log q_i .$$

Припустимо, що кожна з подій a_i, настає одночасно з однією з подій b_j. Тоді можна розглядати нову систему подій, до якої входить повна група таких сполучених подій:

$$ab = \begin{pmatrix} a_1 b_1 & a_1 b_2 \dots . & a_1 b_m \\ a_2 b_1 & a_2 b_2 \dots . & a_2 b_m \\ \overline{a_n} b_1 & \overline{a_n} b_2 \dots . & \overline{a_n} b_m \end{pmatrix}$$

З їх ймовірностями

$$\begin{pmatrix} P_1 q_1 & P_1 q_2 \dots . & P_1 q_m \\ P_n \overline{q_1} & P_n \overline{q_2} \dots . & P_n \overline{q_m} \end{pmatrix}.$$

Відповідно до загальної формули для ентропії запишемо її значення для об'єднаної системи. Очевидно, при цьому необхідно скласти добутки всіх імовірностей об'єднаних подій на логарифми цих імовірностей, тобто

$$H(ab) = -\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} P_i q_i log P_i q_i .$$

$$P_i q_i = \log P_i + \log P_j; \quad \sum_{i=1}^{n} P_i = 1; \quad \sum_{i=1}^{m} q_j = 1.$$

Після простих перетворень одержимо :

$$H(ab) = -\sum_{j=1}^{m} q_j \sum_{i=1}^{n} P_i log P_i - \sum_{i=1}^{n}$$

$= H(a) + H(b)$.

Якщо дві випадкові величини *X* і *У* якимось чином пов'язаані одна з одною (інакше кажучи, існує кореляційна залежність між *X* і *У),* то знання будь-якої з них, очевидно, зменшує невизначеність іншої. Невизначеність, шо залишається, оцінюється умовною ентропією. Умовна ентропія *X* за умови відомого *У* визначається як

$$H(X|Y) = \sum_{i=1}^{K} P(X_i|Y_j)\log P(X_i|Y_j). \qquad (3.10)$$

де $P(X_i|Y_j)$ - умовна ймовірність (імовірність *i*-го значення *X* за умови $Y=Y_j$; діапазони змінювання *X i* Y (відповідно *N* і *K)* не обов'язково однакові.

Поняття умовної ентропії в теорії інформації використовується при визначенні взаємозалежності між символами кодованого алфавіту, втрат інформації, яка передається по каналах зв'язку, при обчисленні ентропії об'єднання. Якщо є *n* залежних об'єктів або параметрів управління, то загальна кількість інформації в системі управління може визначатися як

$$H(X_1,X_2,X_3,\ldots,X_n) =$$

$$= H(X_1) + H(X_2 \mid X_1) + H(X_3 \mid X_2X_1) + \ldots + H(Xn \mid X_1,X_2X_3\ldots X_{n-1}). \qquad (3.11)$$

Ентропія першого об’єкта (параметра) у наведеному виразі враховується повністю, ентропія другого — з урахуванням того, що значення ентропії першого вже визначено, ентропія третього — за умови відомості ентропій перших двох об’єктів і так далі.

У загальному випадку ентропія об’єднання двох об’єктів задовольняє нерівність $H(X, Y) \le H(X) + H(Y)$. Це пояснюється тим, що умовна ентропія завжди менша або дорівнює безумовній, тобто $H(X|Y) < H(Y)$. Максимального значення ентропія об’єднання досягає лише тоді, коли об’єкти або параметри управління є статистично незалежними.

У випадку повної залежності об’єктів управління стан одного з них повністю визначає стан іншого, тобто вони є еквівалентними: $H(X, Y) = H(X) = H(Y)$, оскільки $H(X|Y) = 0$.

Взаємна інформація завжди має невід’ємне значення. Вона дорівнює нулю, якщо між *X* і *Y* немає залежності, і набуває максимального значення, що збігається з безумовною ентропією, коли між *X* і *Y* існує однозначний зв’язок. Таким чином, безумовна ентропія визначає максимальний обсяг інформації, який потенційно може міститися в системі:

$0 \le IXY \le H(X),\ 0 \le IYX \le H(Y)$.

Якщо у мережі задано *X* об’єктів (параметрів) управління та *Y* можливих подій, то вплив кожної події на об’єкти, між якими існують кореляційні зв’язки, може бути повністю описаний за допомогою відповідної матриці.

$$\blacksquare(\blacksquare(\ @y)_1 1@y_1 2@\ \dots\ @y_1 i@\ \dots @y_\downarrow n\ )\ [\blacksquare(x_\downarrow 1\&x_1 2\&\ \dots\&x_1 j\&\ \dots\&x_1 n@p(x_1 1\ |y_1 1)\&p(x_1 2\ |y_\downarrow 1$$

Отже, зміна стану будь-якого елемента мережі x_j описується розподілом умовної ймовірності вигляду $p(x_j|y_i)$, а умовна ентропія для елементів ***X*** щодо події y_j

$$H = (X|y_j) = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i|y_j). \qquad (3.12)$$

Повна умовна ентропія для повідомлень *X* щодо повідомлення *Y*

$$H = (X|Y) = -\sum_j p(y_j)\sum_i p(x_i|y_j)\log p(x_i|y_j). \qquad (3.13)$$

Кількість інформації визначається різницею між безумовною і умовною ентропіями. Це зменшення невизначеності типу «знання чогось за рахунок того, що відоме щось». При цьому має місце властивість симетричності інформації *I*, тобто $I_{YX} = I_{XY}$ **:**

$$I_{XY} = H(X) - H(X|Y) = H(Y) - H(Y|X) = I_{YX}.$$

Важливою характеристикою умовної ентропії системи управління із залежними повідомленнями є те, що при незмінній кількості повідомлень у ансамблі джерела її значення зменшується зі збільшенням частоти появи повідомлень, між якими існує статистичний взаємозв’язок. Це означає, що наявність таких зв’язків призводить до зменшення кількості інформації, яку несе кожне окреме повідомлення.

Зниження ентропії джерела управління зі зростанням статистичної залежності між повідомленнями можна трактувати як скорочення інформаційної ємності цих повідомлень. Іншими словами, повідомлення, що мають взаємозв’язки, містять у середньому менше нової інформації, ніж ті, що є статистично незалежними. Якщо ж джерело формує послідовність повідомлень із відомими статистичними зв’язками, то частину з них можна вважати надлишковою, оскільки їхній зміст можна відновити на основі вже наявних залежностей. Це відкриває можливість передавання повідомлень у скороченій формі без втрати інформації, яку вони містять.

Кількісну оцінку надлишковості можна отримати з таких міркувань. Щоб передати певний обсяг інформації *I*, джерело без надлишковості має сформувати середню кількість повідомлень $k_0 = I / H_0$, а джерело з надлишковістю — $k_n = I / H_n$.

Оскільки $H_0 > H_n$, то $k_n > k_0$, тобто джерело, що створює надлишкові повідомлення, повинно передавати більшу їх кількість для забезпечення тієї самої кількості інформації.

Надлишкова кількість повідомлень $\Delta k = k_n - k_0$, а надлишок джерела

$$\chi = \frac{k_n - k_0}{k_n} = \frac{\Delta k}{k_n} = 1 - H_n / H_0 .$$

У деяких ситуаціях виникає необхідність визначення закону розподілу ймовірності випадкової величини за відомими її моментами. Такий підхід може бути корисним, зокрема, для вибору оптимального розподілу ймовірностей під час передавання повідомлень або керуючих команд у системах управління, коли відомі відхилення параметрів мережного елемента від його оптимальних значень.

Відповідно до принципу максимуму (екстремуму) ентропії, подібне завдання може бути розв'язане як окрема задача варіаційного числення. У цьому разі дисперсія випадкової величини може вважатися або заданою, або довільною. Розглянемо варіант, коли дисперсія є заданою.

3.3 Методика розрахунку інформаційних потоків в системі управління з урахуванням взаємозалежності між контрольованими параметрами

До системи управління надходять дані про роботу телекомунікаційної мережі та її окремих складових. Після обробки отриманої від керованих елементів інформації формується узагальнена модель інформаційного стану мережі, на основі якої приймаються управлінські рішення різного рівня та виконуються відповідні дії.

Ступінь інформаційної адекватності цієї моделі визначається точністю оцінювання інформаційних потоків керуючих сигналів, урахуванням динамічних змін цих потоків та кореляційних залежностей між ними.

Якість динамічних моделей значною мірою залежить від таких факторів: правильного врахування стохастичної природи змінних об'єкта моделювання; контролю достовірності моделі на всіх етапах її життєвого циклу — від проектування до впровадження; інваріантності щодо фізичної суті процесів, а також здатності моделі адекватно описувати як статичні, так і динамічні властивості об'єкта.

Для визначення кількості інформації, що передається в системі управління мережею, необхідно оцінити співвідношення дисперсій відхилень параметрів повідомлень, які аналізуються в різних умовах функціонування мережі. Таку оцінку можна здійснити, спираючись на вимоги до параметрів мережі, що працює в нормальному режимі.

Водночас інформаційні потоки в системах управління часто є взаємозалежними, адже зміна стану одного керованого елемента зазвичай викликає відповідні зміни в інших об'єктах мережі. Кількість інформації для залежних повідомлень завжди менша, ніж для незалежних, і визначається як

$$I(x_1, x_2) = H(x_1) - H(x_2 / x_1). \qquad (3.14)$$

Якщо кількість параметрів управління дорівнює m, то

$$I(x_1,x_2,\ldots,x_m) = p(x_1,x_2)\,[\log p(x_1) + \log p(x_2) - \log p(x_1, x_2)] - p(x_1, x_3)[\log p(x_1) +$$

$+\log p(x_3) - \log p(x_1,x_3)] - \ldots - p(x_1,x_m)[\log p(x_1) + \log p(x_m) - \log p(x_1,x_m)]$

або

$$I(x_1, x_2, \ldots, x_m) = p(x_1, x_2) \log \frac{p(x_1, x_2)}{p(x_1) p(x_2)} + \cdots$$

Виходячи з припущення про нормальний закон розподілу щільності ймовірності, кількість інформації управління з урахуванням кореляційних зв'язків між об'єктами і параметрами управління визначатиметься так:

$$I(x_1, x_2, \ldots, x_m) = \log \frac{\sigma_1 (1 - k_1 n_1)}{\sigma_1} + \log \frac{\sigma_2 (1 - k_2 n_2)}{\sigma_2} + \cdots + \log \frac{\sigma_m (1 - k_m n_m)}{\sigma_m}. \quad (3.15)$$

$\acute{\sigma}_i$ – середньоквадратичне відхилення параметрів мережі від необхідних значень до включення системи управління; σ_i – середньоквадратичне відхилення параметрів керованої мережі від необхідних значень після включення системи управління; n_i – кількість кореляційних зв'язків; k_i – коефіцієнт, який залежить від кількості кореляційних зв'язків між контрольованими параметрами мережі телекомунікацій; $i = 1,2,\ldots,m$.

Врахувати взаємозв’язок параметрів мережі, що підлягають контролю можна і не вираховуючи кореляційні зв’язки між ними. Для цього скористаємось розглянутим на початку розділу поняттям «взаємної інформації».

Це поняття описує кількість інформації, що міститься в одній величині відносно другої величини і визначається співвідношенням:

$$I(X, Y) = H(Y) - H(Y \mid X). \quad (3.16)$$

Спільна ентропія досягає свого максимального значення лише у випадку, коли об’єкти або параметри управління є статистично незалежними. Якщо ж між ними існує повна залежність, то стан одного об’єкта повністю визначає стан іншого, тобто вони є еквівалентними:

$H(X, Y) = H(X) = H(Y)$,

оскільки умовна ентропія при цьому дорівнює нулю — $H(X|Y) = 0$.

Взаємна інформація між параметрами дорівнює нулю у випадку їх незалежності, а свого максимуму — рівного безумовній ентропії — вона досягає за наявності однозначного зв'язку між *X* і *Y*.

Ентропія в системі управління відображає ступінь відхилення контрольованих параметрів мережі від нормативних значень. До моменту активації системи управління ці відхилення мають випадковий характер і можуть бути значними. Після запуску система, формуючи певну кількість керуючої інформації, поступово переводить мережу в стан, коли відхилення параметрів не перевищують допустимих меж. Таким чином, величина ентропії безпосередньо залежить від розміру відхилень: чим вони більші, тим вищою є ентропія.

Розподіл випадкових відхилень контрольованих параметрів, як правило, підкоряється нормальному закону розподілу. Варто зазначити, що якщо дисперсія станів об'єктів управління телекомунікаційної мережі є заданою, то максимальне значення ентропії досягається саме тоді, коли стани елементів мережі розподілені за нормальним законом.

Нормальний розподіл при заданих умовах відповідає саме максимуму ентропії і цей максимум дорівнює:

$$H = \log(\sqrt{2\pi}\sigma) = \log(4{,}13\sigma), \tag{3.18}$$

де σ – дисперсія або значення відхилення контрольованого параметру телекомунікаційної мережі від норми.

При заданому середньому квадраті нормальний розподіл відповідає найбільшій невизначеності системи з усіх можливих розподілів.

Враховуючи вищесказане, формулу визначення кількості управляючої інформації через різницю ентропій для двох контрольовоних параметрів можна записати в наступному вигляді:

$$I_{x,y} = \log\frac{\sigma_x}{\sigma_x} + \log\frac{\sigma_y}{\sigma_y},$$

Беручи до уваги взаємозалежність і кореляційні зв'язки між контрольованими параметрами, можна стверджувати, що між ними існує певна взаємна інформація. У випадку, коли дві величини є залежними, загальний обсяг інформації зменшується, адже знання значення однієї з них знижує невизначеність іншої. Ця зменшена невизначеність дорівнює величині взаємної інформації, що міститься в одній змінній відносно іншої.

З урахуванням зазначеного, кількість керуючої інформації для двох взаємопов'язаних параметрів телекомунікаційної мережі можна виразити формулою, що враховує наявність взаємної інформації між ними:

$$I_{\downarrow}(x,y) = (\log [\sigma]_{\downarrow} x/\sigma_{\downarrow} x + \log [\sigma]_{\downarrow} y/\sigma_{\downarrow} y)$$

Розкривши праву частину формули отримаємо:

$$I_{\downarrow}(x,y) = (\log [\sigma]_{\downarrow} x/\sigma_{\downarrow} x + \log [\sigma]_{\downarrow} y/\sigma_{\downarrow} y) - p(y)\cdot \log [1/p($$

де $p(y)$ – вірогідність відхилення від норми параметра y ; $p(y \mid x)$ – умовна вірогідність відхилення від норми параметра *y* за умови, що параметр *x* не відповідає нормі.

У загальному випадку для *m* взаємозалежних параметрів телекомунікаційної мережі формула визначення кількості управляючої інформації матиме наступний вигляд:

$$+p(x_1, x_2)\log\frac{p(x_1, x_2)}{p(x_1)p(x_2)} + \cdots + p(x_1, x_m)\log\frac{p(x_1, x_m)}{p(x_1)p(x_m)}\Bigg|. \qquad (3.22)$$

Використовуючи формулу (3.22), можна визначити обсяг керуючої інформації для вибраної телекомунікаційної мережі з урахуванням заданої точності параметрів та наявності між ними взаємозалежності, вираженої через взаємну інформацію. Запропонований підхід може бути застосований у будь-якій сучасній системі управління різнорідними мережами.

Для проведення розрахунків використовуються вхідні дані, що містять відомості про:

- об’єкти управління;
- параметри цих об’єктів;
- відхилення параметрів від нормативних або допустимих значень.

Під час вибору об’єктів та параметрів управління враховуються як необхідна точність розрахунків, так і практичні потреби системи управління.

Доцільно виконувати розрахунок кількості керуючої інформації в інтерактивному режимі, що дозволяє оператору системи зручно обирати потрібні об’єкти та параметри управління залежно від конкретної ситуації.

На основі викладених вище положень і отриманих теоретичних співвідношень було здійснено розрахунок необхідного обсягу керуючої інформації, враховуючи взаємозалежність контрольованих параметрів телекомунікаційної мережі. Обчислення виконано з використанням вихідних даних та результатів, наведених у джерелах [2] та [9].

Розрахунок за розробленою методикою проведено для таких об’єктів управління:

- лінійні тракти;
- системи передачі з частотним розподілом каналів;
- системи передачі з часовим розподілом каналів;
- мережні тракти (первинні, вторинні, третинні);

- радіорелейні тракти;
- лінії передачі.

Параметри, що використовувалися для оцінювання стану обраних об’єктів управління мережею, наведено в таблиці 3.1. Дані параметри були отримані в результаті аналізу нормативно-технічної документації, що регламентує експлуатацію телекомунікаційних мереж.

Таблиця 3.1 – Відхилення параметрів системи управління

№ № п/п	Параметри	Відхилення параметрів системи управління			
		До вмикання	Після вимикання	При вмиканні на 1 с	Під час вимкнення через випадков. фактор
	Рівень контрольных частот трактів в системах передачі, дБ:				
1	Лінійних на виході.	13,5	1,35	4,5	6,75
2	Мережних з частотним розподілом каналів.	6,0	0,6	2,0	3,0
	Коефіцієнт трактів в мережах передачі з часовим РК:				
3	Лінійних	10^{-6}	10^{-10}	10^{-8}	10^{-7}
4	Мережних	10^{-6}	10^{-10}	10^{-8}	10^{-7}
5	Тиск повітря в кабелі, атм	0,15	0,015	0,05	0,075
6	Рівень КЧ ЛТ в НПП, дБ	12,9	1,3	4.3	6,45
7	Відхилення рівня струмів КЧ, дБ:				
	від номінальних значень на передачі	±1,0	±0,1	±0,3	±0,5
8	на виході лінійного тракту	±5,0	±0,5	±1,7	±2,5
9	Відхилення АЧХ в робочій смузі частот лінійного тракту, дБ	±5,0	±0,5	±1,70	±2,5
10	Відхилення залишкового підсилення лінійного тракту від його середнього значення вимірюваного на КЧ 0,308; 1,056 МГц, дБ	±3,0	±0,3	±1,0	±1,5
11	Відхилення характеристик групового часу проходження відносно частоти 2,5 МГц в смузі частот 1,9...8,6 МГц, с	±1,5	±0,15	±0,5	±0,75
12	Віхилення рівня КЧ 4,287 МГц ланцюга КК-ОПП на виході приймальної частини стойки, дБ	±4,0	±0,4	±1,33	±2,0
13	Відхилення АЧХ у рабочій смузі частот на частоті 4 МГц ланцюга КК-ОПП				
	КК-ОПП на виході приймальної частини стійки, дБ	15,0	±1,5	5,0	7,5
14	Різниця в рівні передачі (допуск на згасання станційного кабеля)', дБ	15,0	1,5	5,0	7,5
15	Різниця в рівнях передачи (допуск на згасання станц. кабеля)[2], дБ	15,0	1,5	5,0	7,5
16	Теж саме[3]	5,0	0,5	1,7	2,5
17	Номінальный відносний рівень на вході тракта передачі[4], дБ:				
	за потужністю	10,8	1,08	3,6	5,4
	за напругою	13,5	1,35	4.5	6,75
18	Теж саме[3], дБ				
	за потужністю	10,8	1,08	3,6	5,4
	за напругою	12,6	1,26	4,2	6,3

№ № п/п	Параметри	Відхилення параметрів системи управління			
		До вмикання	Після вимикання	При вмиканні на 1 с	Під час вимкнення через випадков. фактор
19	Номінальний відносний рівень на вході тракту прийому', дБ:				
	за потужністю	6.9	0,69	2,3	3,45
	за напругою	9.6	0,96	3,2	4,8
20	Теж саме[3], дБ:				
	за потужністю	6.9	0.69	2.3	3.45
	за напругою	8,7	0,87	2,9	4,35

Продовження таблиці 3.1 – Відхилення параметрів системи управління

№ № п/п	Параметри	Відхилення параметрів системи управління			
		До вмикання	Після вимикання	При вмиканні на 1 с	Під час вимкнення через випадков. фактор
21	Допустима середня потужність підсумкового навант. в ЧНН', дБ/Вт	3,6	0,36	1,2	1,8
22	Теж саме[2], дБ/Вт	1,8	0,18	0,6	0,9
23	Теж саме[3], дБ/Вт	0,9	0,09	0,3	0,45
24	Різниця між середнім і номінальним рівнем прийому', дБ	±5,0	±0,5	±1,7	±2,5
25	Модифікація частоти передавальгого сигналу для уніфікованої апаратури', Гц	2,0	0,2	0,7	1,0
26	Точність підтримки діаграми рівня', дБ	5,0	0,5	1,7	2,5
27	Допустиме відхилення рівня прийому[2], дБ	7,5	0,75	2,5	3,75
28	Точність установленого рівня прийому[2], дБ	±3,0	±0,3	±1,0	±1,5
29	Різниця між середнім і номінальним рівнем прийому[2], дБ	5,0	0,5	1,7	23,5
30	Захищеність від підсумкових завад, не менше', дБ	7,8	0,78	2,6	3,9
31	Точність підтримки діаграми рівня[2], дБ	±10	±1,0	±3,3	±5,0
32	Допустиме відхилення рівня прийому[2], дБ	7,5	0,75	2,5	3.75
33	Точність установленого рівня прийому[3], дБ	±3,0	±0,3	±1,0	±1,5
34	Різниця між середнім і номінальним рівнем прийому[3], дБ	±5,0	±0,5	±1,7	±2,5
35	Захищеність від підсумкових завад, не менше[2], дБ	9,0	0,9	3,0	4,5
36	Точність підтримки діаграми рівня[3], дБ	±10	±1	±3,3	±5
37	Рівень контрольних частот радіорелейних трактів, дБ	5,0	0,5	1,7	2,5 .
38	Залишкове згасання[5], дБ	5,1	0,51	1,7	2,55
39	Відносний рівень передачі на передачі[5], дБ	3,9	0,39	1,3	1,95
40	Теж саме, передачі на прийомі[5], дБ	1,2	0,12	0,4	0,6
41	Потужність навантаження[5], Вт	6,6	0,66	2,2	3,3
42	Рівень потужності завад (для довжини 320...640 км)[5], дБ	16,5	1,65	5,3	8,25
43	Електроживлення[6], В	±7,2	±0,72	±2,4	3,6
44	Рівень струмів КЧ 18,432; 9,216: 0.768 МГЦ*, дБ	±3,0	±0,3	±1,0	±1,5
45	Напруга джерел електроживлення (акумуляторні батареї, ДП), В	±50	±5	±17	±25,5

Примітки:

1 —мережний третинний тракт;
2—мережний вторинний тракт;
3—мережний первинний тракт;
4—мережний третинний и вторинний тракти;
5 — параметр каналів ТЧ;
6 — параметр апаратури і обладнання;
7 — параметр лінії передач.

Таблиця 3.2 – Розрахункові данні кількості інформації за зміною параметрів

Номер параметру	Кількість інформації управління за 1 с, біт	Приріст ентропії керованої мережі, біт	Загальна кількість інформації біт
1	1,74	3,32	3296
2	6,64	13,29	12657
3	1,73	3,31	3275
4	1,58	3,32	3022
5	1,77	3,32	3347
6	1,77	3,32	3347
7	1,74	3,32	3296
8	1,74	3,32	3296
9	1,73	3,32	3289
10	1,74	3.32	3296
11	1,74	3.32	3296
12	6,64	13,29	12657
13	1,77	3,32	3347
14	1,74	3,32	3296
15	1,74	3,32	3296
16	1,74	3,32	3296
17	1,74	3,32	3296
18	1,74	3,32	3296
19	1,74	3,32	3296
20	1,74	3,32	3296
21	1,74	3,32	3296
22	1,77	3,32	3347
23	1,72	3,32	3270
24	1,74	3,32	3296
25	1,74	3,32	3296
26	1,74	3,32	3296
27	1,74	3,32	3296
28	1,74	3,32	3296
29	1,74	3,32	3296
30	1,77	3,32	3347
31	1,74	3,32	3296
32	1,72	3,32	3270
33	1,74	3,32	3296
34	1,74	3,32	3296
35	1,74	3,32	3296
36	1,77	3,32	3347

Номер параметру	Кількість інформації управління за 1 с, біт	Приріст ентропії керованої мережі, біт	Загальна кількість інформації біт
37	1,81	3,32	3423
38	1,77	3,32	3347
39	1,77	3,32	3347
40	1,74	3,32	3296
41	1,74	3,32	3296
42	1,74	3,32	3296
43	1,74	3,32	3296
44	1,74	3,32	3296
45	1,74	3,32	3296

Отримані в процесі дослідження вихідні дані відображають як проміжні, так і кінцеві результати розрахунків. Зокрема, вони містять такі показники:

- обсяг керуючої інформації, що формується системою управління внаслідок відхилення параметрів при її вимкненні протягом 1 секунди (див. табл. 3.2, графа 2);
- приріст ентропії стану керованої мережі (табл. 3.2, графа 3);
- загальну кількість інформації, передану протягом перехідного процесу тривалістю 60 секунд у системі управління, з урахуванням кількості об’єктів управління та вибраних для них параметрів (див. табл. 3.2, графа 4);
- кількість каналів зв’язку, необхідних для передавання розрахованого обсягу інформації за різної пропускної здатності каналів (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Число каналів, необхіних для передачі розрохованої кількості інформації за різної пропускною спроможністю каналів

Пропускна спроможність каналу, біт/с	Загальна кількість інформації управління з урахуванням усіх параметрів, що регулюються, біт/с	Число каналів, необхідних для передачі інформації управління, штук
1200	177063	114
2400	177063	74
4800	177063	37
9600	177063	18

Врахувавши взаємозалежності контрольованих параметрів телекомунікаційної через взаємну інформацію, проведемо перерахунок отриманих даних. Результати такого перерахунку представлені у табл. 3.4 нижче.

Таблиця 3.4 – Число каналів, необхіних для передачі розрохованої кількості інформації з урахуванням взаємозалежності контрольованих параметрів

Пропускна спроможність каналу, біт/с	Загальна кількість інформації управління з урахуванням усіх параметрів, що регулюються, біт/с	Число каналів, необхідних для передачі інформації управління, штук
1200	123357	103
2400	123357	52
4800	123357	26
9600	123357	12

Аналіз результатів, наведених у таблиці 3.4, показує, що врахування взаємозалежності між параметрами управління телекомунікаційною мережею дає змогу знизити загальний обсяг керуючої інформації приблизно на 30 %. Це, у свою чергу, дозволяє використовувати меншу кількість каналів зв’язку для передавання інформації управління або застосовувати канали з нижчою пропускною здатністю. Такий підхід сприяє раціональнішому використанню мережевого ресурсу для передавання корисного трафіку та прискорює процес повернення інвестицій, вкладених у модернізацію системи управління.

Крім того, слід підкреслити, що інформаційно-ентропійний підхід є універсальним, оскільки не залежить від кількості та природи об’єктів управління і може бути застосований до будь-якого типу телекомунікаційних мереж незалежно від їхньої структури чи масштабу.

ВИСНОВКИ

Сукупність наукових результатів, сформульованих і обґрунтованих у магістерській роботі, становить вирішення науково-практичного завдання дослідження методів розрахунку параметрів систем управління мереж наступного покоління (NGN) та побудови ефективної системи управління, спрямованої на підвищення продуктивності та надійності функціонування телекомунікаційних мереж.

У процесі виконання роботи отримано такі основні наукові та практичні результати:

- Висвітлено сучасні тенденції створення конвергентних мереж на основі концепції FMC. Детально проаналізовано принципи побудови конвергентних мереж як систем із різнорідним устаткуванням, визначено основні типи архітектур, що забезпечують глобальну доступність послуг. Запропоновано доцільність упровадження цих підходів у мережах зв'язку України для підвищення ефективності та економічності надання як традиційних, так і інноваційних послуг. Окреслено перспективи подальшої еволюції мереж наступного покоління у напрямку побудови багатовимірних мережевих структур.
- Розглянуто основні принципи функціонування технології багатопротокольної комутації міток (MPLS) та обґрунтовано доцільність її застосування для організації транспортного рівня в мережах NGN. Показано, що використання MPLS забезпечує гнучке керування трафіком, підвищує швидкодію та ефективність використання мережевих ресурсів, а також сприяє розв'язанню ключових завдань, що постають перед операторами зв'язку під час експлуатації сучасних телекомунікаційних систем.
- Проведено аналіз поточного стану розвитку та впровадження сучасних технологій управління телекомунікаційними мережами. Узагальнено концептуальні підходи до створення системи управління NGN, здатної забезпечити комплексне керування гетерогенними мережами, побудованими на основі різних технологій і стандартів. Визначено, що однією з ключових задач є розрахунок мінімальної кількості управляючої інформації, необхідної для підтримання заданої точності параметрів контрольованих об'єктів.
- Запропоновано використання інформаційно-ентропійного методу для визначення обсягу управляючої інформації в системах управління мережами NGN. На основі цього підходу розроблено методику розрахунку кількості керуючої інформації з урахуванням взаємозалежності між контрольованими параметрами телекомунікаційної мережі, що виражається через взаємну інформацію. Розрахунки показали, що врахування взаємозв'язків між параметрами дозволяє зменшити загальний обсяг інформації управління приблизно на 30 %, що, у свою чергу, знижує потребу в каналах передачі керуючих даних та підвищує ефективність використання мережевого ресурсу для передавання корисного трафіку.

Отримані результати мають як теоретичне, так і прикладне значення, оскільки запропонована методика є універсальною і може бути використана для систем

управління будь-яких типів телекомунікаційних мереж, незалежно від їхньої структури, масштабу та технологічної основи. Реалізація представлених рішень сприятиме підвищенню ефективності функціонування мереж наступного покоління та забезпеченню їх подальшого сталого розвитку.

ПЕРКЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бакланов И. Г. NGN: принципы построения и организации. –М.:Эко-Трендз, 2008 г. – 400 стр.
2. Беркман Л.Н. Інформаційно-ентропійні підходи до розрахунку параметрів систем керування інтелектуальної мережі// “Зв’язок”.- 1999.-№4. -С.14-16.
3. Беркман Л.Н., Кривуца В.Г., Стеклов В.К., Управління телекомунікаціями із застосуванням новітніх технологій. Підручник для студентів вищ. навч.закл. за напрямком “Телекомунікації”/–К.:Техніка, 2007. –384с.
4. Гольдштейн А.Б, Гольдштейн Б.С., Конвергенция технологий в операторских сетях. Сценарии возможные и невозможные// «Connect! Мир связи» – №10, октябрь 2007.
5. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. – БХВ-Петербург, 2005 г. –304 с.
6. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. "Softswitch". - Изд-во "БХВ - Санкт-Петербург", 2006 г. - 367 ст.
7. Росляков А.В. Сети следующего поколения NGN. –М.: Эко-Трендз, 2008 г. – 424 стр.
8. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проектування телекомунікаційних мереж: Підруч. для вищ. навч. закл. за напрямком «Телекомунікації». – К.: Техніка, 2002. – 792 с.
9. ЗюкоЛ.Г., КловскийД.Д.. Назаров М.В., ФинкЛ.М. Теория передачи сигналов.— М.: Радио и связь, 1986.— 304с.
10. ITU-T Rec. Q.1702 (06/2002) Long-term vision of network aspects for systems beyond IMT-2000
11. ITU-T Rec. Y.2021 (09/2006) IMS for Next Generation Networks.
12. ITU-T Rec. Y.2091 (03/2007) Terms and definitions for Next Generation Networks.