

## ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНО РЕАЛІЗОВАНОГО ПРОГНОСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ У ЗАХИЩЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

*Приведені результати застосування методики програмного прогностичного контролю до вирішення практичних завдань прогнозування стану існуючих захищених інформаційних мереж.*

**Ключові слова:** прогностичний контроль, трафік, провайдер, захищена інформаційна мережа, чинники відмов

*Приведены результаты применения методики программного прогностического контроля к решению практических задач прогнозирования состояния существующих защищенных информационных сетей.*

**Ключевые слова:** прогностический контроль, трафик, провайдер, защищенная информационная сеть, факторы отказов

*The results of application of method of programming prognostics control are resulted to the decision of practical tasks of prognostication of the state of existent a secure informative networks.*

**Keywords:** prognosticheskiy control, traffic, provider, protected informative network, factors of refuses

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями.** Завдання контролю технічного стану і, особливо, програмного прогностичного контролю сучасних захищених інформаційних мереж (ЗІМ) є комплексною науково-технічною проблемою. Її повне рішення можливе лише для конкретних даних мереж, хоча загальні принципи, синтезовані моделі і методики дозволяють вирішувати цю задачу з прийнятною точністю стосовно мереж інших типів. **Аналіз останніх досліджень і публікацій** показує, що стосовно мереж, по темі, яка винесена в заголовок статті, були присвячені численні роботи Е. Вентцель, В. Мудрова, Л. Евланова та ін. [1-4]. У класичній монографії В. Тихонова [5] показано, що питання планованої стійкості, завадозахищеності та надійності інформаційних систем тісно пов'язані з розробкою та аналізом їх математичних моделей в рамках теорії випадкових процесів. На наш погляд, актуальність стохастичного підходу (Б. Льовін [6]) до аналізу процесів прогностичного контролю також зберігається для ЗІМ та для всіх мереж нової генерації – NGN (*Next Generation Networks*). Т.ч., основоположними роботами в області аналізу математичних моделей, які стосуються досліджуваного питання, слід визнати роботи А. Колмогорова, Би. Льовіна, В. Ширяєва, Е. Вентцель, І. Гихмана та ін. [7...10]. Стосовно теми статті, в цих роботах сформульована методологія отримання оцінок надійності функціонування складних систем з випадковими параметрами. Ці ідеї отримали розвиток в роботах Р. Судакова, М. Айзермана, В. Вольського та ін. [11, 12] – стосовно аналізу стану і контролю технічних систем. Разом з тим, слід зазначити, що стосовно ЗІМ методологія аналізу технічного стану тільки починає розроблятися. Зокрема, фундаментальні питання вибору системи показників якості NGN [13] лише останнім часом знаходять відображення в роботах проф. В. Гольдштейна і його співавторів [14]. Тут відмічено, що «...важливою обставиною, стимулюючою розробку сучасних засобів контролю показників якості обслуговування і вдосконалення методик аналізу отриманих результатів, є тенденція розвитку

мереж загального користування у напрямі NGN, що характеризується зміною технологій передачі та комутації. Розповсюдження пакетних технологій передачі та комутації, які складають суть NGN, радикально міняє підхід до оцінки якості функціонування мереж зв'язку».

Виходячи з сказаного, *метою статті* є застосування та аналіз існуючих методик до вирішення практичних завдань прогностичного контролю на різних мережах, включаючи ЗІМ. Для цих цілей використовувався, зокрема, розроблений модуль програмного забезпечення. Серед часткових завдань, показаних у статті, відзначимо наступні:

- визначення фази гармонійних складових;
- прогнозування та аналіз точності прогнозів різної терміновості і встановлення ступеня адекватності приведених моделей;
- аналіз взаємпливу окремих чинників відмов ЗІМ;
- розробка рекомендацій по застосуванню приведених методик.

Перейдемо до викладу *основного матеріалу* та на першому етапі проведемо оцінку фаз гармонійних складових спостережуваних процесів зміни трафіку в сучасних ЗІМ.

Аналіз графіків завантаження портів різних мереж обміну трафіком показує стійкість добових коливань трафіку. Деякі приклади графіків завантаження портів приведені на рис. 1...3. Аналіз доступних літературних джерел показав, що приведені приклади цілком відповідають аналогічним процесам в ЗІМ.

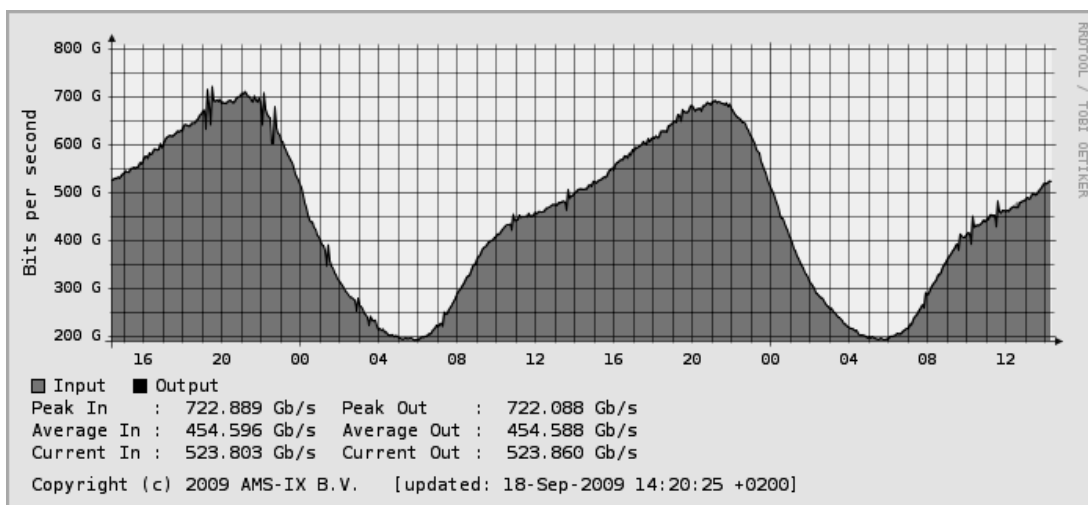


Рис. 1 – Добовий графік завантаження провайдера Amsterdam Internet Exchange [15]

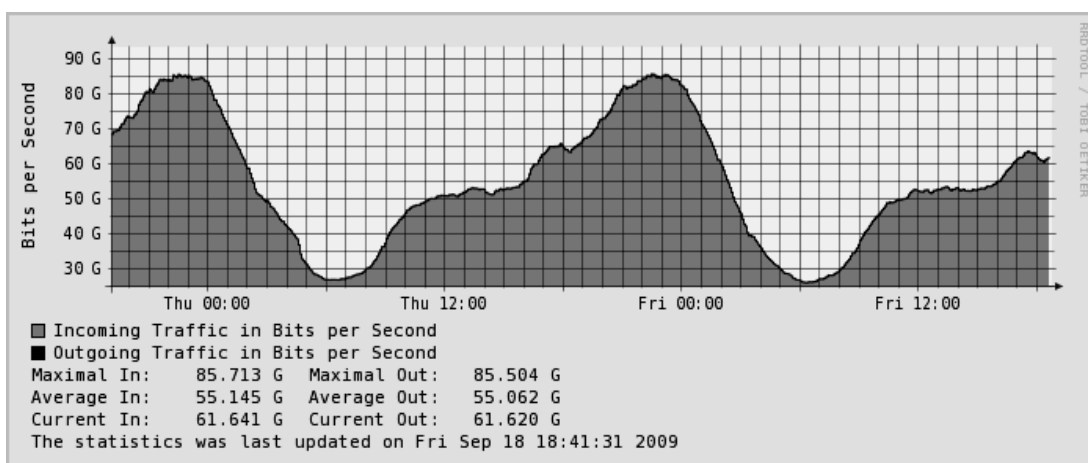


Рис. 2 – Добовий графік завантаження провайдера Hong Kong Internet Exchange [16]

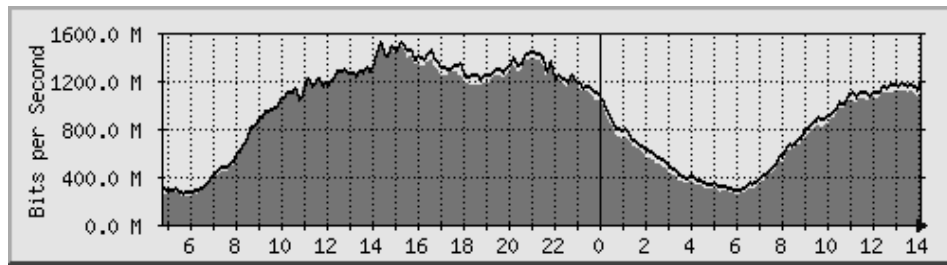


Рис. 3 – Добовий графік завантаження провайдера Israel Internet Exchange [17]

На всіх графіках час розуміється як місцевий декретний час. Аналіз графіків, приведених на рисунках, дозволяє ще до проведення обчислень, зробити загальні висновки про характер добового завантаження портів обміну трафіком:

- у всіх випадках є чітко виражений мінімум завантаження приблизно з 4-ї до 7-ї години ранку;

- максимуми навантаження в різних мережах можуть припадати на різний час; найбільш типові піки навантаження на мережу припадають на денний час: 12-18 години (переважання ділового трафіку) або на вечірній час приблизно з 19 до 22 години (переважання трафіку розваг та спілкування). Результати розрахунків для години найбільшого навантаження (ГНН) і години мінімального навантаження (ГМН) представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики особливих точок добового трафіку

Характеристика	Регіон		
	Західна Європа, Ізраїль	Східна Європа	Азія
Середня ГМН	5,4	5,9	6,1
СКВ ГМН	0,25	0,32	0,24
50%-й розмах	5,6 $\pm$ 0,12	6,0 $\pm$ 0,16	6,0 $\pm$ 0,11
Середня ГНН	16,7	19,2	20,4
СКВ ГНН	3,46	3,74	1,68
50%-й розмах	17,4 $\pm$ 2,17	19,8 $\pm$ 2,86	20,2 $\pm$ 1,04

Примітка: СКВ – середньоквадратичне відхилення

При проведенні досліджень і аналізу трафіку вибірка здійснювалася по 10 мережам обміну трафіком азіатського регіону, 10 мережам обміну трафіком західноєвропейського регіону і 10 мережам обміну трафіком східноєвропейського регіону, включаючи Українські точки обміну трафіком OdEx, OdIx, UaIx. Обчислення ГНН та ГМН здійснювалися згідно алгоритму квазіоптимального обчислення фази, а також відповідно до методів спектрального аналізу з використанням процедур швидкого перетворення Фур'є. Обидва методи дали приблизно однакові результати, але розроблений квазіоптимальний алгоритм виявився ефективнішим по швидкодії для вирішуваного завдання.

Як характеристики точності визначення середнього часу настання ГНН та ГМН в табл. 1 використане емпіричне СКВ і 50%-й розмах розподілу (50% значень потрапляють в цей симетричний інтервал щодо медіани емпіричного розподілу).

Аналіз характеристик, приведених в табл. 4 дозволяє зробити наступні висновки:

- найбільш характерним моментом для визначення фаз гармонійних складових в сучасних ЗІМ є ГМН, який з дуже високою точністю для всіх типів мереж і різних регіонів світу складає 6 годин ранку;

- ГНН є істотно менш стійкою характеристикою фази, оскільки істотно залежить від змісту трафіку (діловий – розважальний та ін.) та від регіону. Західноєвропейський трафік має переважачу ділову складову, східноєвропейський – приблизно рівні долі ділового і розважального трафіку, в азіатському трафіку переважає складова розваг та спілкування.

Менш виражені тенденції тижневого трафіку, проте практично для всіх регіонів і для всіх типів мереж можна зробити висновок про те, що день найбільшого навантаження (ДНН) припадає на середу-четвер, а день мінімального навантаження (ДМН) – на суботу-неділю.

При прогнозуванні середньої терміновості (2-6 місяців) тижневі коливання можна виключити, усереднюючи дані вимірювань за тиждень з достатньо високою частотою відліків (не менше години). При цьому на коротких інтервалах обробки даних – приблизно тиждень – регулярними складовими поліноміального типу можна нехтувати, а сума відліків періодичної функції типу «синус» або «косинус» за період дасть нуль.

Річні періодичності виявилися менш помітними на великих мережах в порівнянні з регулярними складовими, що мають, як правило, монотонно зростаючий характер. Як приклад нижче приведено графік зміни сумарного навантаження на портах найбільшої мережі обміну трафіком LINX (*London Internet Exchange*) – рис. 4. Тенденція зміни трафіку в ЗІМ має невеликі відхилення в порівнянні з рис. 4, але, в принципі, підкоряється тим же законам зміни.

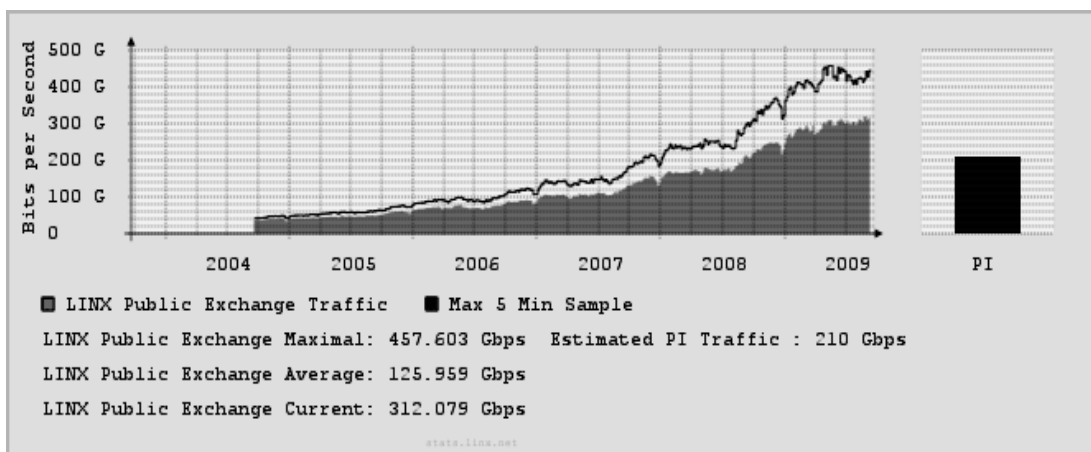


Рис. 4 – Графік сумарного навантаження портів провайдера LINX за 5 років

Аналіз останнього графіка показує, що в довгострокових прогнозах важливо враховувати в основному постійні та лінійні складові, тоді як при аналізі річних тенденцій важливо враховувати падіння трафіку, в основному, в період новорічних свят.

Тепер покажемо вирішення завдань прогностичного контролю по зайнятості смуги пропускання для ЗІМ.

Практично завдання прогностичного контролю вирішувалися для трьох провайдерів Одеського регіону, що надають послуги для захищених корпоративних комп'ютерних мереж. Надалі називатимемо їх «умовними провайдерами». Вибір цих провайдерів був здійснений виходячи з того, що вони будують і обслуговують мережі різних типів (а не тільки для ЗІМ) і, відповідно, мають переважні включення різних абонентів (корпоративних, індивідуальних, субпровайдерів). Приведемо характеристики згаданих провайдерів для повнішого розуміння рішення поставленої нами задачі.

*Провайдер 1* – «класичний» інтернет-провайдер, що пройшов в своєму розвитку всі стадії розвитку мережі Інтернет і який приступив до її конвергенції в NGN. Типовими абонентами є корпоративні клієнти (з технічної точки зору – локальні мережі) та індивідуальні абоненти. Послуги надаються з використанням радіотехнологій, виділених ліній, комутованих ліній. Переважаючий трафік – діловий.

*Провайдер 2* – велика «домашня мережа», побудована на основі Ethernet-технології. Типові абоненти – індивідуальні. Основний тип трафіку – розважальний, трафік спілкування. Послуга – мультисервіс, включаючи стандартні послуги мережі Інтернет, VOIP, IPTV, додатки реального часу типу Skype. 80% магістральних та міжквартирних каналів передачі даних засновано на оптоволоконних технологіях.

*Провайдер 3* – типова мережа обміну трафіком (*Backbone*). Є могутнім вузлом комутації та маршрутизації трафіку. Типовий абонент – субпровайдер. Включення в порти обміну

трафіком – виключно по оптоволоконних каналах передачі даних. Переважаючий трафік – невідомий, оскільки на мережі обміну змішується трафік різнотипних провайдерів.

Для всіх цих провайдерів здійснювалося рішення задачі прогнозування на короткий період (від 2-х тижнів до 2-х місяців), середній період (від 2-х до 4-х місяців) і на тривалий період (від 4-х місяців до року). Метою завдання була перевірка методики прогнозування, виявлення характеристик точності прогнозів, а також виявлення найбільш прийнятних прогностичних моделей по критерію максимуму відтворюваності. Показник відтворюваності обчислювався як середній модуль відхилення квантилів розподілів нев'язності на пробній і контрольній вибірках, тобто  $Q = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\delta_{l,k}^{i?} - \delta_{l,k}^{ei o?}|$ .

Для обчислення цього показника використовувалася процедура швидкого ранжирування вибірок, реалізована програмно, і побудована по алгоритму, аналогічному алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Як конкуруючі моделі застосовувалися залежності вигляду:

$$\varphi(t) = \varepsilon(t) + a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_N t^N + a_{N+1} \cos(\omega_1 t + \beta_1) + a_{N+2} \cos(\omega_2 t + \beta_2) + \dots + a_{N+k} \cos(\omega_k t + \beta_k),$$

а конкретніше – вирішувалося завдання часткового перебору структур на моделях, вигляд і відповідні номери яких показані в табл. 2.

Таблиця 2 – Структури прогностичних моделей

Умовний номер моделі	Вид прогностичної моделі $y(t) = \dots$	Кількість вільних параметрів
1	$a_0$	1
2	$a_0 + a_1 t$	2
3	$a_0 + a_1 t + a_2 t^2$	3
4	$a_0 + a_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2)$	2
5	$a_0 + a_1 t + a_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2)$	3
6	$a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2)$	4
7	$a_0 + a_n \cos(\omega_n t + \beta_n)$	2
8	$a_0 + a_1 t + a_n \cos(\omega_n t + \beta_n)$	3
9	$a_0 + a_1 t + a_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2) + a_n \cos(\omega_n t + \beta_n)$	4
10	$a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2) + a_n \cos(\omega_n t + \beta_n)$	5

У табл. 2 вважається, що гармонійні складові добова («д») і тижнева («н») мають окремо обчислені фази і кругові періоди, відповідні 24 і 168 годинам. Застосування розроблених методик дало результати, зведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Зведення результатів прогнозування зайнятості смуги пропускання

Характеристика прогнозу	Провайдер		
	Пров-1	Пров-2	Пров-3
<b>Найкраща короткострокова модель</b>	4	5	5
Відносна помилка прогнозу	12%	8%	9%
Інтервал прогнозу відмови, дні	6	5	5
<b>Найкраща середньострокова модель</b>	2	3	4
Відносна помилка прогнозу	17%	12%	14%
Інтервал прогнозу відмови, дні	15	12	14
<b>Найкраща довгострокова модель</b>	2	2	3
Відносна помилка прогнозу	23%	16%	18%
Інтервал прогнозу відмови, дні	32	25	28

Зробимо ряд зауважень до зведення отриманих результатів.

1. У табл. 3 структури моделей відповідають їх умовним номерам з табл. 2.

2. У завданні прогностичного контролю моделювалася відмова по виходу зайнятої смуги пропускання за призначений рівень. При цьому відносна помилка прогнозу обчислювалася у відсотках як відношення періоду прогнозування до отриманої помилки прогнозу.

3. Інтервал прогнозу визначався як інтервал між найближжайшим і найвіддаленішим моментами виходу за задану смугу пропускання, визначеними по методиці інтервального прогнозування, розроблений автором на основі відомих літературних методик.

Аналіз зведення характеристик з табл. 3 дозволяє зробити наступні висновки:

- відносна точність прогнозування залежить від терміновості прогнозу: при довгострокових прогнозах точність вирішення завдань прогностичного контролю падає;
- для короткострокових прогнозів доцільно застосовувати прогностичні моделі з гармонійною добовою складовою;
- для прогнозів середньої терміновості доцільно застосовувати моделі з гармонійною тижневою складовою;
- для довгострокових прогнозів доцільно застосовувати поліноміальні моделі з максимальним ступенем не вище другий;
- вид моделі залежить від конкретної мережі і її поточного стану.

Останній висновок підтверджується істотною відмінністю оптимальної структури моделей для середньострокового прогнозу для всіх провайдерів. Неформальний аналіз початкових даних і залучення додаткової інформації показали, що під час рішення задачі прогнозування до провайдера-3 підключилося істотне додаткове навантаження, що привело до появи квадратичної складової в моделі, тоді як кількість абонентів провайдера-1 залишилася приблизно постійною.

Точність прогнозів у всіх випадках залишилася прийнятною для вирішення практичних завдань. Насправді, розроблена методика дозволяє здійснювати прогнози середньої терміновості з точністю до декількох днів, середньої терміновості – з точністю приблизно до півмісяця, довгострокові прогнози – з точністю близько місяця. Така точність дозволяє при вирішенні практичних завдань прогностичного контролю здійснювати попереджуючі заходи для запобігання відмовам в наданні послуг.

Тепер приведемо результати оцінювання взаємовпливу чинників. При розгляді алгоритмів прогнозування в моделі багаторівневого оператора Г.Альтшуллера (відомого, наприклад, з [18]), на прикладі одного з умовних провайдерів була виявлена значна кореляція між зайнятою смугою пропускання магістральних портів та іншими чинниками, що впливають на відмовостійкість. Повнішу картину залежностей чинників представляють результати розрахунків, приведені в табл. 4 для раніше охарактеризованих трьох провайдерів.

При отриманні результатів, представлених в табл. 4, спочатку відшукувалася кореляція представлених параметрів із загальною смугою пропускання зовнішніх портів. При цьому кореляція таких чинників, як відсоток втрат пакетів і затримки виявилася невисокою – в межах 0,5. Докладніший неформальний аналіз процесів показав, що при невисокій зайнятості загальної смуги пропускання (до 0,7) в сучасних захищених мережах дані чинники відмов зводяться до мінімуму.

В той же час, при зростанні навантаження смуги пропускання до рівня 0,7-0,8 і більше, негативні чинники – затримки пакетів, джиттер, втрати пакетів – виявляються практично лінійно пов'язаними з об'ємами трафіку. Дані табл. 4 з очевидністю це підтверджують.

Також досить очевидним і підтвердженим розрахунками, опинився факт сильної залежності (рівень кореляції близько 0,9) кількості нарікань клієнтів при виході зайнятості смуги пропускання за рівень 0,8 від сумарного навантаження на зовнішніх портах провайдерських мереж.



Таблиця 4 – Кореляція основних чинників відмовостійкості та інтенсивності відмов з шириною смуги пропускання

Чинник відмовостійкості	Провайдер		
	Пров-1	Пров-2	Пров-3
Втрати пакетів при зайнятості смуги до 0,7	0,42	0,34	0,12
Втрати пакетів при зайнятості смуги від 0,7 до 0,8	0,57	0,48	немає даних
Втрати пакетів при зайнятості смуги від 0,8 до 1	0,83	0,72	немає даних
Затримки пакетів при зайнятості смуги до 0,7	0,68	0,56	0,48
Затримки пакетів при зайнятості смуги від 0,7 до 1	0,87	0,84	немає даних
Кількість абонентів	0,78	0,87	0,68
Сумарне навантаження на рівні доступу (смуга пропускання клієнтських портів)	0,84	0,92	0,71
Кількість програмно-апаратних збоїв	0,62	0,73	немає даних
Кількість нарікань клієнтів на якість надання послуг при зайнятості смуги пропускання до 0,8	0,44	0,62	немає даних
Кількість нарікань клієнтів на якість надання послуг при зайнятості смуги пропускання те 0,8 до 1	0,82	0,92	немає даних

У меншій мірі отриманим результатам можна довіряти в частині наявності залежностей між загальною шириною смуги пропускання і кількістю програмно-апаратних збоїв, оскільки за період досліджень таких збоїв була невелика кількість (всього 44 для всіх провайдерів). При цьому значна кількість таких збоїв на мережі провайдера-2 була викликана виходом з ладу квартальних комутаторів під час гроз.

Базуючись на отриманих результатах, приведемо рекомендації по застосуванню методики прогностичного контролю

Конкретний набір рекомендацій практичного характеру залежить, як видно з приведених вище результатів, від структури та особливостей як конкретної мережі, так і ЗІМ. Разом з тим, отримані результати дозволяють сформулювати ряд рекомендацій по застосуванню методик прогностичного контролю.

1. Усі факти відмов, включаючи відмови в наданні послуг в ЗІМ, повинні документуватися і піддаватися неформальному аналізу.
2. нформативним чинником, який багато в чому визначає відмовостійкість сучасних як інформаційних мереж загального користування, так і ЗІМ, є навантаження на зовнішніх портах. Даний параметр повинен піддаватися не тільки контролю, але й моніторингу. За наслідками моніторингу з використанням розроблених методик можна здійснювати прогнози різної терміновості.
3. Короткострокові прогнози дозволяють порівнювати поточний стан ЗІМ раніше спрогнозованим і у разі виходу параметрів за смугу інтервального прогнозу провайдер повинен здійснювати комплекс операцій по запобіганню розвитку відмови та, у зв'язку з цим, передбачати спеціальні заходи щодо використання каналів, які не відносяться до ЗІМ.
4. Прогнози середньої терміновості повинні враховуватися при формуванні матеріальних запасів на відновлення ЗІМ, замовленню зовнішнього ресурсу у вищестоячого провайдера.
5. Довгострокові прогнози мають практичну цінність для аналізу найбільших мереж обміну трафіком і виявлення загальних тенденцій розвитку галузі телекомунікацій. При цьому конкретний провайдер може прогнозувати моменти технічного переозброєння крупних сегментів мережі Інтернет і робити відповідні попереджуючі операції на своїй мережі. До ЗІМ це питання має тільки непряме відношення.
6. З урахуванням сильної залежності між смугою пропускання і навантаженням на призначені для користувача порти, включаючи кількість абонентів, провайдер повинен робити попереджуючі заходи щодо розширення смуги пропускання при проведенні рекламних акцій або при технічному переозброєнні фрагментів мережі, включаючи ЗІМ.

7. Для забезпечення заданої якості обслуговування необхідно здійснювати прогностичний контроль зайнятості смуги пропускання. Вихід прогностичних значень за рівень 0,7...0,8 повинен вимагати від провайдера виконання комплексу заходів щодо розширення смуги пропускання зовнішніх портів з відповідним забезпеченням умов захисту інформації.

**Висновки.** Приведені результати можуть застосовуватися як орієнтир для розробки методики прогностичного контролю та вирішення практичних завдань прогнозування стану як мереж загального використання, які є частиною загального телекомунікаційного середовища, так і ЗІМ. Отримані результати дозволяють зробити наступні основні висновки:

1. Приведена методика дозволяє вирішувати практичні завдання прогностичного контролю з точністю, достатньою для здійснення попереджуючих заходів для запобігання відмовах в наданні послуг в ЗІМ.
2. Найбільшу практичну цінність мають короткострокові прогнози (від 2-х тижнів до 2-х місяців) і прогнози середньої терміновості (від 2-х до 4-х місяців). Прогнози на триваліший період дозволяють встановити загальносвітові тенденції зміни навантажень на великих мережах.
3. Найбільш прийнятними моделями для короткострокового прогнозування є моделі, що включають поліноміальну складову порядку не вище другого і гармонійну складову з добовим періодом.
4. Коливання добового навантаження на мережах (включаючи ЗІМ) є значним. При цьому найбільш стійкою характеристикою фази добових коливань є ГМН. Ця характеристика практично не залежить від типу циркулюючого в мережі трафіку та від регіональної приналежності мережі. Загальносвітовою закономірністю є мінімальне навантаження на мережі приблизно о 6 годині ранку за місцевим часом.
5. Найбільш інформативним параметром відмовостійкої сучасних мультисервісних мережах та ЗІМ є сумарна зайнятість смуги пропускання зовнішніх портів. Цей параметр сильно корелюється з кількістю абонентів провайдера і навантаженням на портах підмереж. У меншій мірі, але також цей параметр зв'язаний і з числом можливих програмно-апаратних відмов в ЗІМ.
6. Вихід займаної смуги пропускання за межі 0,7...0,8 від максимальної смуги пропускання приводить до лавиноподібного наростання небажаних ефектів: збільшується кількість помилкових і недоставлених пакетів, джиттер, затримки доставки пакетів. Кореляція цих чинників відмов зі смугою пропускання під час переходу через межу 0,7 виявляється надзвичайно високою. Нарешті, кількість скарг абонентів на якість надання послуг, як підсумковий показник якості, в цьому випадку значно зростає.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДОКУМЕНТІВ

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 264 с.
2. Мудров В.И. Методы обработки измерений (квазиправдоподобные оценки). – М.: Сов. Радио, 1976. – 322 с.
3. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. – М.: Наука, 1979. – 432 с.
4. Дедков В.К., Северцев Н.А. Основные вопросы эксплуатации сложных систем. – М.: Сов. Радио, 1976. – 406 с.
5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Советское радио, 1984.
6. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. Радио, 1968.
7. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей. – М.: Наука, 1974. – 364 с.
8. Ширяев А.Н. Вероятность. – М.: Наука, 1980. – 576 с.
9. Ветцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1969. – 576 с.
10. Гихман И.И., Скороход А.В. Теория случайных процессов. – М.: Наука, 1973. – 639 с.
11. Судаков Г.В. Общая теория функциональных систем. – М.: Сов. Радио, 1984. – 224 с.



12. Айзерман М.А., Вольский В.И., Литвак Б.Л. Элементы теории выбора. Псевдокритерии и псевдокритериальный выбор. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.
13. Гольдштейн Б.С., Маршак М.Д., Мишин Е.Д. и др. Контроль показателей качества обслуживания с учетом перехода к сети связи следующего поколения // Техника связи, 2009, №1 – С. 14-21.
14. Арцишевский В.В., Гольдштейн Б.С., Маршак М.Д., Федосов М.Ю. Контроль учета объема передаваемой информации и длительности сеанса на мультисервисных сетях // Метрология и измерительная техника в связи. – 2005, №5.
15. Статистика сети обмена трафиком AMS-IX (Amsterdam Internet Exchange) // [Электронный ресурс]: <http://www.ams-ix.net/technical/stats/>.
16. Статистика сети обмена трафиком HKIX (Hong Kong Internet Exchange) // [Электронный ресурс]: <http://www.hkix.net/hkix/stat/aggt/hkix-aggregate.html>.
17. Статистика сети обмена трафиком IIX (Israel Internet Exchange) // [Электронный ресурс]: <http://www.isoc.org.il/iix/mrtg/total.html>.
18. Альтшуллер Г.С. О применении АРИЗ к электронике, радиотехнике и схемным задачам // [Электронный ресурс]: <http://www.altshuller.ru/triz/investigations6.asp>.