

Нестеренко М.М., Толюпа С.В., Успенський О.А.

ПРОБЛЕМА ІНВАРІАНТНОСТІ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

Анотація:

До сучасних систем управління мережами зв'язку пред'являються досить жорсткі вимоги по завадостійкості. Під інваріантністю розуміється здатність системи автоматичного управління протистояти заважаючим впливам. В статті досліджено проблеми інваріантності в системах управління мережами зв'язку різних класів.

Аннотация:

К современным системам управления сетями связи предъявляются достаточно жесткие требования по помехоустойчивости. Под инвариантностью понимается способность системы автоматического управления противостоять влиянию помех. В статье исследованы проблемы инвариантности в системах управления сетями связи различных классов.

Abstract:

To improved network management imposed strict requirements on noise immunity. By invariance is the ability of the automatic control systems to resist interference. In this paper the problem of invariance in network management systems of different classes.

Передбачити архітектуру мереж нового покоління і навіть загальні принципи побудови досить складно, але проведений аналіз тематики деяких сучасних теоретичних досліджень в області складних систем і різноманітних мережевих структур дозволяє зробити деякі припущення про можливу зовнішність і навіть деякі особливості мереж майбутнього. Є підстава вважати, що це будуть багатовимірні мережі. Для використання потенційних можливостей багатовимірної інтегрованої мережі знадобляться адекватні методи дослідження і пошуку якнайкращих рішень, що не стали ще традиційними.

Навіть поверхневе знайомство з архітектурою мереж наступного покоління дозволяє зробити висновок, що у світі комунікацій відбуваються значні зміни. Народжується нова універсальна технологія передачі різних типів трафіка по єдиній мережній інфраструктурі. Все це ставить непрості завдання як перед сервіс-провайдерами, так і перед розробниками й виробниками встаткування для інфокомунікаційних мереж нового покоління.

Проблема управління інфокомунікаційними мережами є однією з найважливіших у практиці експлуатації мереж. Загальновизнаною концепцією управління – є концепція, яка передбачає наступні рівні управління: елементами мережі; мережею; послугами; бізнесом.

На відміну від систем автоматичного регулювання високоточні та якісні системи автоматичного управління працюють за складними критеріями якості, які дають змогу реалізувати в системі управління оптимальний процес. Розвиток якісних систем управління став можливим завдяки бурхливому розвитку обчислювальної техніки і, зокрема, широкому застосуванню цифрових обчислювальних машин [1].

Метою управління телекомунікаціями взагалі та автоматизації управління зокрема є забезпечення оптимального функціонування мереж телекомунікацій відповідно до їх призначення в умовах різноманітних змінних впливів.

Кожну систему управління можна умовно поділити на дві основні частини – підсистему прийняття рішення та підсистему виконання рішень. Перша реалізується у [Information Technology and Security](#) № 2(2)-2012

вигляді програмно-технічних засобів технічної експлуатації. Враховуючи це, основний принцип систем управління полягає в наданні організаційної архітектури для забезпечення взаємозв'язку різноманітних типів операційних систем та/або телекомунікаційного обладнання для обміну інформацією управління з використанням погодженої архітектури зі стандартними інтерфейсами, включаючи протоколи і повідомлення.

Мережа управління телекомунікаціями може забезпечувати функції управління та зв'язок як між різними операційними системами, так і між операційною системою і єдиним елементом обладнання зв'язку до складної мережі, що взаємопов'язує багато різноманітних типів операційних систем і обладнання телекомунікацій.

Слід зазначити, що в умовах розмаїття телекомунікаційних та інформаційних технологій, їх швидкого прогресу та конвергенції, різноманітності типів та розгалуженості мереж, зростаючого попиту користувачів на нові послуги та підвищення вимог до їх якості, конкуренції на ринку телекомунікацій тощо, виникають усе нові й нові задачі, пов'язані з оптимізацією управління мережами телекомунікацій. Відповідно набуває особливої ваги визначення та вирішення різноманітних наукових проблем і задач підвищення показників якості систем і пристроїв управління – від загальномережних та загальнооператорських задач оптимізації управління, пов'язаних з побудовою надійних, ефективних, гнучких структур до підвищення надійності, точності, швидкодії окремих компонент – систем управління та контролю їх ефективності [2].

До сучасних систем управління мережами зв'язку (СУМЗ) пред'являються досить жорстокі вимоги по завадостійкості. Сучасна СУМЗ, побудована з урахуванням багато вимірності та багаторівневості мереж, призначена для управління різноманітною інфокомунікаційною мережею, тому, найбільш важливою є задача забезпечення збору даних про стан параметрів контрольованих об'єктів. Для передачі управляючої інформації в СУМЗ доцільно використовувати канали зв'язку різного типу, які є основою, зокрема місцевих мереж зв'язку. Тобто на другому рівні мережі необхідно реалізувати надійну систему передачі даних. Проаналізуємо методи досягнення цієї мети.

У каналі зв'язку з постійними характеристиками імовірність помилки є постійною величиною, і, отже, можна заздалегідь спроектувати систему так, щоб її завадостійкість задовольняла заданим вимогам.

У каналах зв'язку з змінними характеристиками імовірність помилки є змінною величиною (неоднорідний канал зв'язку). У цьому випадку, якщо навіть вдається забезпечити середнє значення імовірності помилки нижче заданої припустимої величини, в окремі інтервали часу імовірність помилки стає більше припустимого значення. Більш того, у нестационарному каналі зв'язку, на відміну від стаціонарного, зменшення середньої імовірності помилки не свідчить однозначно про поліпшення якості функціонування системи. Якщо, наприклад, поряд зі зменшенням середньої імовірності помилки збільшився відсоток випадків, коли імовірність помилки більше припустимої, то варто вважати, що завадостійкість системи не збільшилася, а зменшилася.

Таким чином, для забезпечення прийнятної якості роботи реальної системи передачі дискретної інформації в каналі зі змінними характеристиками необхідно підтримувати імовірність помилки на рівні, що не перевищує деякої заданої припустимої величини. Ця задача може вважатися виконаною, якщо:

– імовірність помилки менше заданої і залишається незмінною, незважаючи на наявність завад, що викликають нестационарність каналу зв'язку;

– імовірність помилки під впливом завад, що викликають нестационарність каналу, змінюється довільно в області значень, менших заданого, і не перевищує цього значення ні при яких змінах характеристик каналу зв'язку [3].

В обох випадках можна говорити, що задана якість функціонування системи досягається завдяки незмінності ймовірності помилки, її незалежності від тих причин, що викликають нестационарність каналу зв'язку. Для позначення цієї властивості доречно використовувати термін “інваріантність”.

Під інваріантністю розуміється здатність системи автоматичного регулювання протистояти заважаючим впливам. У ролі інваріанта виступає тут величина управляючого впливу по одній з координат (чи просто керування). Якщо керування по деякій координаті не залежить від заважаючого впливу, то система автоматичного регулювання називається інваріантною.

Таким чином, потреба в інваріантних СУМЗ викликається необхідністю забезпечення заданої якості передачі інформації в каналі зі змінними характеристиками, тому дослідження даної тематики являється актуальним питанням.

Поняття інваріантності часто використовується в технічних науках для визначення властивості стійкості, нечутливості технічних систем до випадкових змін їхніх параметрів і до різних заважаючих впливів.

Слід відразу ж зазначити, що термін “інваріантна” система вимагає додаткового визначення, а саме: необхідно вказати, яка числова характеристика системи є інваріантом і відносно яких перетворень чи впливів. У випадку коли в СУМЗ в ролі заважаючих впливів виступають перешкоди, а характеристикою системи, що повинна бути інваріантом перешкод, є її завадостійкість, виражена кількісно, наприклад, через імовірність помилки, якщо мова йде про канали передачі управляючої інформації.

СУМЗ, кількісна характеристика завадостійкості якої є інваріантом певного класу перешкод, будемо називати інваріантною стосовно даних перешкод. Це визначення інваріантної СУМЗ можна представити в математичній формі. Якщо позначити через P деяку кількісну характеристику завадостійкості зв'язку, наприклад імовірність помилки, а через Ξ – множина реалізацій розглянутої перешкоди, то в системі, інваріантної до перешкоди Ξ ,

$$P = \text{in var } \Xi . \quad (1)$$

Запис виду (1) досить часто використовується далі, причому в лівій частині рівності завжди стоїть числова характеристика завадостійкості даної СУМЗ, а праворуч – позначення перешкоди, стосовно якої ця характеристика є інваріантом.

Слід спеціально зазначити відмінності в проблематиці інваріантних СУМЗ в порівнянні з інваріантними системами автоматичного регулювання.

У системах автоматичного регулювання впливи, що заважають, і управляючі сигнали, як правило, просторово розділені (у всякому разі, у рамках вивчених у теорії інваріантності ситуацій). Це дозволяє вимірювати заважаючий вплив, (навіть якщо він є випадковим) і застосовувати всілякі компенсаційні методи реалізації інваріантності.

Інша особливість проблеми інваріантності СУМЗ полягає в тому, що в ролі інваріанта виступає не миттєве значення вихідної величини, а деяка її статистична

характеристика, наприклад математичне очікування. Прикладом може служити ймовірність помилки, що є математичним очікуванням періодичності помилок.

Якщо позначити через $n = n(t)$ і $\xi = \xi(t)$ випадкові реалізації, що належать двом множинам завод N і Ξ відповідно, довільну кількісну характеристику заводостійкості через $- P$, а ймовірність помилки $- p$, то у загальному випадку характеристика заводостійкості є функцією обох завод:

$$P = P(N, \xi). \quad (1)$$

Цей запис означає, що розглянута характеристика заводостійкості являє собою результат усереднення по реалізаціях n заводи N , і є функцією параметрів множини N і реалізації ξ з множини Ξ .

Будемо називати систему зв'язку абсолютно інваріантною стосовно заводи Ξ , якщо для усіх $\xi \in \Xi$ виконується рівність:

$$P(N, \xi) = P(N, 0) = P(N). \quad (2)$$

Еквівалентним цьому визначенню будемо вважати також запис:

$$P = in \text{ var } \Xi. \quad (3)$$

За відсутності заводи N з умови інваріантності (2) випливає, що $P(N, \xi) = P(0)$. Якщо, наприклад, характеристикою заводостійкості є ймовірність помилки p , то $p = 0$. При цьому, звичайно, не має змісту розглядати такі тривіальні випадки, як, наприклад, обрив у прийомній антені, при якому ймовірність помилки дорівнює $1/2$ при будь-якій заводі (у тому числі і за її відсутності), і коли формально слід вважати систему інваріантною до заводи. Для того щоб не зараховувати до інваріантних систем подібні, явно безглузді випадки, слід умову інваріантності (3) для ймовірності помилки представляти у вигляді

$$p_{\text{доп}} \geq p = in \text{ var } \Xi, \quad (4)$$

де $p_{\text{доп}}$ – максимально припустиме значення ймовірності помилки в даній системі.

Якщо заводостійкість системи, хоча і залежить від ξ , але відрізняється від значення $P(N, 0)$ при усіх $\xi \in \Xi$ на малу величину $\delta(N, \xi)$, так що $P(N, \xi) = P(N, 0) + \delta(N, \xi)$, то система є відносно інваріантною до заводи Ξ або інваріантною до ε , де ε – задана відстань між $P(N, \xi)$ і $P(N, 0)$. В залежності від прийнятої метрики величина ε може визначатися як максимум $|\delta(N, \xi)|$, середньо-рівномірне чи середньоквадратичне від $\delta(N, \xi)$, за всіма $\xi \in \Xi$. Відповідні визначення величини ε мають вид:

$$\varepsilon = \max |P(N, \xi) - P(N, 0)|; \quad (5)$$

$$\varepsilon = \overline{|P(N, \xi) - P(N, 0)|};$$

$$\varepsilon = \overline{[P(N, \xi) - P(N, 0)]^2}, \quad (6)$$

де ризикою позначене усереднення по реалізаціях $\xi \in \Xi$.

Для позначення інваріантних до ε систем можна використати наступний запис:

$$P_\varepsilon \approx in \text{ var } \Xi.$$

Серед відносно інваріантних до даної заводи систем існує найкраща, *оптимальна відносна інваріантна система*, в якій величина ε мінімальна. Якщо, наприклад, для визначення ε використовується метрика (5), то в оптимальній відносній інваріантній системі

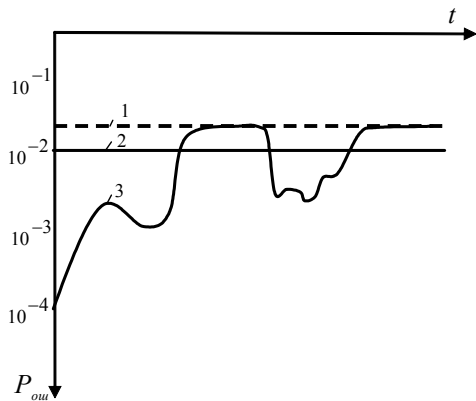


Рис. 1. Дві форми інваріантності СУМЗ: 1 – максимальна допустима ймовірність помилки; 2 – ймовірність помилки при першій формі інваріант-тності; 3 – ймовірність помилки при другій формі інваріантності)

інваріантна або навіть відносно інваріантна система з меншою ймовірністю помилки [4].

Іншими словами, величина ε характеризує ступінь наближення в даному класі відносно інваріантних систем до деякої абсолютно інваріантної (можливо гіпотетичної) системи того ж класу. Однак ця абсолютно інваріантна система, будучи граничною (“пороговою”) для відносно інваріантних систем даного класу, може уступати за завадостійкістю абсолютно інваріантній системі чи навіть відносно інваріантній системі іншого класу.

Тому поняття *оптимальна абсолютна інваріантна СУМЗ*, тобто яка забезпечує найбільшу завадостійкість стосовно завади N серед систем даного класу, абсолютно інваріантних до завади Ξ .

Всі вищенаведені визначення відносилися до оптимальності усередині обмеженого класу інваріантних систем. Такий підхід узагалі характерний для технічних задач, оскільки в техніці, як правило, становлять інтерес системи, що доставляють максимум цільової функції при певних обмеженнях на параметри системи. Це, однак, не виключає інтерес до граничних, потенційних можливостей систем передачі інформації, у зв'язку з чим введемо поняття ідеальної інваріантної системи, визначивши її як абсолютно інваріантну до завади Ξ систему з максимально можливою в даному каналі зв'язку за відсутності завади Ξ завадостійкістю. Зазначимо, що за відсутності завади N будь-яка абсолютно інваріантна до завади Ξ система є ідеальною інваріантною, оскільки в цьому випадку ймовірність помилки дорівнює нулю [5].

Розрізняють кілька форм інваріантності в системах автоматичного регулювання, що відрізняються умовами і методами досягнення інваріантності.

Перша форма припускає існування двох каналів передачі впливу, причому вплив по другому, штучно введеному каналу компенсує вплив по першому каналу. Умовою досягнення першої форми інваріантності є (крім існування двох каналів) можливість одержання рівного нулю сумарного коефіцієнта передачі по заважаючому впливі, від точки прикладання впливу до регульованої координати. У ролі інваріанта в першій формі інваріантності (в абсолютному чи відносному значенні) виступає безпосередньо деяка числова характеристика завадостійкості СУМЗ, наприклад ймовірність помилки, що не змінюється з часом. Тому якщо побудувати графік залежності, наприклад, ймовірності

$$\varepsilon = \max_{\xi \in \Xi} |P(N, \xi) - P(N, 0)| = \min . \quad (7)$$

Величина ε показує, наскільки ймовірність помилки (чи інша характеристика завадостійкості) у даній системі більша від ймовірності помилки в тій же системі за відсутності завади Ξ , тобто вона є критерієм якості реалізації властивості інваріантності стосовно Ξ у даній системі. Цей критерій, однак, нічого не говорить про те, чи досягнутий у даній системі найкращий можливий результат.

Якщо, наприклад, $\varepsilon = 0$, тобто здійснена абсолютно інваріантна система, це ще не означає, що не існує інша абсолютно інваріантна або навіть відносно інваріантна система з меншою ймовірністю помилки [4].

помилки інваріантної системи (у першій формі) від часу, то він буде прямою лінією, рівнобіжною осі абсцис (рис.1).

Друга форма інваріантності пов'язана з використанням глибокого негативного зворотного зв'язку. Якщо величина управляючого сигналу по деякій координаті відома, то відхилення від неї, викликані заважаючим збурюванням, можна компенсувати за допомогою спеціального ланцюга зворотного зв'язку. При дуже великому коефіцієнті підсилення в ланцюзі будь-які відхилення практично цілком компенсуються. При *другій формі інваріантності* в ролі інваріанта виступає граничне значення числової характеристики завадостійкості. У цьому випадку ймовірність помилки може змінюватися довільно в області значень, менших від $p_{\text{доп}}$, але не перевершує величину $p_{\text{доп}}$ ні при яких реалізаціях завади. Друга форма інваріантності СУМЗ ілюструється кривою 3, рис. 1.

Третя форма інваріантності в системах автоматичного регулювання досягається при одноканальній передачі збурювання до точки керування шляхом створення ланцюга з рівною нулеві передатною функцією для збурювання. Створення подібного ланцюга можливо тільки при апріорно відомій формі збурюючого впливу.

Розглянемо проблему інваріантності в СУМЗ різних класів.

Вище згадувалося про необхідність розрізняти СУМЗ різного класу, оскільки вони мають неоднакові можливості з точки зору досягнення інваріантності до тих чи інших завад. Доцільно виділити наступні три класи СУМЗ [6].

1. Системи з постійними параметрами (або зі стаціонарними алгоритмами): передача і прийом сигналів здійснюються за допомогою незмінних у часі і не залежних від зовнішніх умов перетворень.

2. Системи з адаптивним приймачем: алгоритм обробки сигналу на передавальній стороні – постійний, а алгоритм прийому сигналів може змінюватися в залежності від зовнішніх умов і за внутрішньою програмою.

3. Адаптивні системи: алгоритми передачі і прийому сигналів можуть узгоджено змінюватися в залежності від зовнішніх умов і за внутрішньою програмою; реалізація адаптивних систем вимагає, як правило, зворотного каналу зв'язку.

Системи другого і третього класів являють собою системи зі змінними параметрами.

Можливості зазначених класів систем з точки зору підвищення завадостійкості, природно, різні. Наприклад, у системах з постійними алгоритмами, як правило, не можна реалізувати когерентний прийом, у той час як у системах з адаптивним приймачем його можна реалізувати практично завжди. В класі адаптивних систем, на відміну від перших двох класів, можна змінювати методи модуляції і кодування сигналу і т.ін.

Разом з тим вибір того чи іншого класу систем визначається не їх потенційними можливостями, а чисто технічними або тактичними причинами, наприклад неможливістю організації зворотного каналу і т.ін. Тому, як правило, є сенс говорити не про безумовну оптимальність системи, а про оптимальність у визначеному класі систем. Це повністю відноситься до інваріантних систем.

Нехай, наприклад, при відсутності завади Ξ когерентний прийом у даному каналі зв'язку можна реалізувати системою з постійними параметрами, а при дії завади Ξ – тільки системою з адаптивним приймачем. Тоді очевидно, що в класі систем з постійними параметрами стосовно даної завади не можна побудувати ідеальну інваріантну систему,

оскільки вона вимагає виконання когерентного прийому, і можна говорити тільки про систему, оптимальну в даному класі.

Задачу побудови інваріантної СУМЗ можна вирішувати у всіх трьох зазначених класах. У системах з постійними параметрами інваріантність стосовно завади Ξ досягається за рахунок вибору відповідних фіксованих сигналу S (оператор передавача) і алгоритму його обробки Φ (оператор приймача). У системах з адаптивним приймачем сигнал S вибирається, а алгоритм Φ змінюється в залежності від характеристик Ξ таким чином, щоб виконувались умови інваріантності. В адаптивних системах з метою досягнення інваріантності змінюються в залежності від умови зв'язку як оператор приймача, так і оператор передавача.

Проаналізуємо можливості інваріантних систем різних класів.

1. У класі адаптивних СУМЗ можна побудувати систему, інваріантну до будь-якої випадкової завади. Справедливість цього твердження впливає з загальних положень теорії Шеннона оптимального кодування [7], відповідно до якої ймовірність помилки за допомогою належного кодування (перетворення повідомлення в сигнал у передавачі) і відповідного декодування (перетворення суміші сигналу з завадою в повідомлення в приймачі) можна зробити як завгодно малою, якщо швидкість роботи I джерела інформації менша від пропускної здатності каналу C .

Дійсно, в адаптивній системі зв'язку можлива погоджена зміна операторів передавача і приймача в залежності від характеристик завади. Отже, які б не були ці характеристики, можна забезпечити (за допомогою належного кодування) ймовірність помилки, меншу від заданої припустимої, тобто побудувати інваріантну в другій формі систему, якщо тільки $I < C$. Якщо ж під впливом зміни характеристик завади пропускна здатність стає рівною чи меншою від швидкості роботи джерела, то в адаптивній системі можна зменшити швидкість так, щоб як і раніше виконувалася нерівність $I < C$, тобто перейти до попереднього випадку.

Приведений доказ не є конструктивним, а твердження про необмежені можливості адаптивних систем з погляду досягнення інваріантності має характер теореми існування, аналогічної другій теоремі Шеннона про кодування в каналі з шумом [8].

У розглянутій гіпотетичній адаптивній системі зв'язку передбачається використання коду, що виправляє помилки і забезпечує завадостійкість не нижче від заданої при деяких фіксованих характеристиках завади. Якщо характеристики завади змінилися таким чином, що завадостійкість системи впала до неприпустимо низького значення, варто застосувати код з великою надмірністю або з великою довжиною. Для формування команд про зміну способу кодування сигналу приймач повинний мати пристрій вимірювання вірності передачі інформації або пристрої вимірювання характеристик завади, які визначають пропускну здатність каналу зв'язку.

У системах з постійними параметрами характеристика завадостійкості може бути інваріантом обмеженого класу завад. Оскільки в системах з постійними параметрами способи передачі і прийому сигналів фіксовані, і швидкість роботи джерела не регулюється, в них при значному зменшенні пропускної здатності каналу неминуче зростає ймовірність помилки, що свідчить про неможливість побудови в даному класі систем, інваріантних до будь-якої випадкової завади.

СУМЗ з адаптивним приймачем займають проміжне місце за своїми можливостями між адаптивними системами і системами з постійними параметрами. З одного боку, клас

завад, стосовно яких у цих системах може бути досягнута інваріантність, обмежений, власне кажучи, так само, як і в системах з постійними параметрами. Але, з іншого боку, оскільки в адаптивному приймачі можливе самонастроювання з оптимізацією прийому за характеристиками завади і параметрами сигналу, у відповідних системах можна одержати більш високу “якість інваріантності”, тобто, наприклад, меншу, ніж у системах з постійними параметрами, ймовірність помилки стосовно завади N при збереженні інваріантності ймовірності помилки до завади Ξ .

Слід зазначити, що можливість здійснення інваріантності в системах зі змінними параметрами багато в чому залежить від швидкості зміни параметрів завади і сигналу. Якщо адаптивні пристрої встигають відслідковувати ці параметри без зниження завадостійкості прийому, відповідні системи можна вважати інваріантними до діяння завад; якщо ж ні, то іноді приходиться використовувати інваріантні системи з постійними параметрами, свідомо допускаючи зниження середньої вірогідності інформації.

Таким чином в статті досліджено проблеми інваріантності в СУМЗ різних класів. Встановлено, що інваріантні системи з адаптацією в безперервному каналі ефективні при порівняно плинній зміні характеристик каналу і при тривалих діяннях каналу потужною завадою. Використання систем з адаптацією в дискретному каналі найбільш доцільно при завадах, що приводять до короткочасних зникнень сигналу і сильного групування помилок.

Література:

1. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проектирование телекоммуникационных сетей. –К.: Техника, 2002. – 792 с.
2. Стеклов В.К., Костік Б.Я., Беркман Л.Н. Сучасні системи управління в телекомунікаціях. – К.: Техника, 2005. – 390 с.
3. Толюпа С.В., Рудик Л.В. Інваріантність телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. III науково – практичний семінар ВІТІ НТУУ КПІ “Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” 8 грудня 2005 року. – Київ, ВІТІ НТУУ “КПІ” – с. 98 .
4. Чаадаев В.К., Шеметова И.В., Шибаева И.В. Информационные системы компаний связи.// - М.: Эко-Трендз, 2004. – 256 с.
5. Терсков В.Г. Метод расчета систем с комбинированным управлением. Теория инвариантности в системах автоматического управления. М.: Наука, 1998. – 260 с.
6. Тельдбаум А.Л. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Наука, 1966. - 623 с.
7. Гостев В.И., Стеклов В.К. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами. К.: Радиоаматор. – 1998. – 704 с.
8. Винницкий В.П., Хиленко В.В. Методы системного анализа и автоматизации проектирования телекоммуникационных сетей: Монография.- К. Интерлинк, 2002. - 192 с.