

УДК 004.7.052:004.414.2

Савченко А.С., к.т.н., докторант (*Національний авіаційний університет*)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТЬЮ

Савченко А.С. Дослідження характеристик стійкості системи управління корпоративною мережею. У роботі представлені результати аналізу асимптотичної стійкості системи управління великою корпоративною мережею за наявності випадкових затримок доставки інформації. Процеси в таких системах адекватно описуються диференціальними рівняннями з аргументами, що відхиляються. Проведено аналіз стійкості по перехідним характеристикам і розташуванню полюсів системної функції на z -площині. Знайдено області стійкості системи при різних значеннях затримки інформаційного сигналу і коефіцієнта зворотного зв'язку.

Ключові слова: ОБЧИСЛЮВАЛЬНА МЕРЕЖА, СТІЙКІСТЬ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ

Савченко А.С. Исследование характеристик устойчивости системы управления корпоративной сетью. В работе представлены результаты анализа асимптотической устойчивости системы управления крупной корпоративной сетью при наличии случайных задержек доставки информации. Процессы в таких системах адекватно описываются дифференциальными уравнениями с отклоняющимися аргументами. Проведен анализ устойчивости по переходным характеристикам и расположению полюсов системной функции на z -плоскости. Найдены области устойчивости системы при различных значениях задержки информационного сигнала и коэффициента обратной связи.

Ключевые слова: ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Savchenko A.S. Study of the characteristics of stability control system corporate network. The results of the analysis of the asymptotic stability of the management system of a large corporate network in the presence of random delays in delivery. Processes in such systems are adequately described by differential equations with deviating arguments. The stability of the transient characteristics and location of the poles of the system function in the z -plane. The ranges of stability of the system for different values of the delay data signal and the feedback factor.

Keywords: COMPUTER NETWORK, STABILITY, MANAGEMENT SYSTEM

Введение и постановка задачи. На сегодняшний день основной задачей крупных корпоративных вычислительных сетей является предоставления качественных услуг по распределенной обработке информации, которая в значительной степени определяется развитостью механизма управления сетью.

В работе [1] предложена модель системы управления корпоративной вычислительной сетью или ее автономным сегментом (АС) и концепции «оптимального администратора», основными задачами которой являются: мониторинг и прогноз состояния сети в реальном времени, выработка оптимальных управляющих воздействий и их реализация с последующим анализом эффективности. На начальном этапе работы системы управления строится модель на основе результатов анализа параметров и структуры АС. В процессе текущего функционирования АС выполняется сбор статистики, идентификация, строится прогноз его состояния. Данные прогноза вводятся в эталонную модель для текущей коррекции. В системе управления осуществляется поиск объектов в сети и сбор статистик для обучения эталонной модели сегмента. Далее выполняется мониторинг всех объектов и формируется прогноз работоспособности сети. Концепция «оптимального администратора» подразумевает использование параллельно с администратором сети, имеющим стандартную квалификацию и опыт работы, экспертной системы, которая служит и в качестве поддержки

администратора, как лица принимающего решение, и для последующей оценки эффективности его работы.

Сложность задачи управления крупной корпоративной сетью заключается в том, что сеть является сложной стохастической системой. Никогда не имеется полной информации о параметрах и состоянии сети, об отказах и/или перегрузках отдельных сетевых узлов, маршрутов, сегментов сети. Кроме того, информация о состоянии сети поступает на центр управления с задержкой, которая носит случайный характер, соответственно и сигналы (команды) управления поступают с запаздыванием. В таких условиях особенно актуальным является вопрос об устойчивости системы управления корпоративной сетью или ее АС.

Устойчивость систем управления. Одним из первых вопросов, возникающих при исследовании и проектировании систем автоматического управления, является вопрос об их устойчивости. Линейная система считается асимптотически устойчивой [2, 3], если при выведении ее внешними воздействиями из состояния равновесия (покоя) она возвращается в него после прекращения этих воздействий. Если после исчезновения внешнего воздействия система не возвращается к состоянию равновесия, то она либо является неустойчивой, либо находится на границе устойчивости. Иными словами система будет асимптотически устойчивой, если выполняется условие $\lim_{t \rightarrow \infty} y_{\text{п}}(t) = 0$, т.е. система является сходящейся.

Для нормального функционирования системы необходимо, чтобы она была устойчивой, так как в противном случае ошибки в ней становятся недопустимо большими.

Поскольку вычислительные сети являются дискретными системами, рассмотрим условия, при которых такие системы остаются устойчивыми.

В общем случае, если математическая модель дискретной системы описывается разностным уравнением вида,

$$x[k+n] + a_1 \cdot x[k+n-1] + \dots + a_n \cdot x[k] = b_1 \cdot u[k+n-1] + \dots + b_n \cdot u[k], \quad (1)$$

то собственное движение задается системной функцией $\varphi[k] = c_1 \cdot z_1^k + c_2 \cdot z_2^k + \dots + c_n \cdot z_n^k$,

где z_1, z_2, \dots, z_n – корни характеристического уравнения (для простых корней)

$$a_0 z^n + a_1 \cdot z^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (2)$$

разностного уравнения (1); c_1, c_2, \dots, c_n – постоянные величины, зависящие от начальных условий [2].

Тогда очевидно, что системная функция стремится к нулю, если все корни характеристического уравнения (2) лежат внутри окружности единичного радиуса, т.е. если

$$|z_v| < 1, \quad v=1, 2, \dots, n.$$

Иными словами, чтобы дискретная система была асимптотически устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы корни ее характеристического уравнения имели модуль меньше единицы. Система будет находиться на аperiodической границе устойчивости, если в ее характеристическом уравнении имеется корень $z_v = 1$, а остальные корни располагаются внутри круга единичного радиуса.

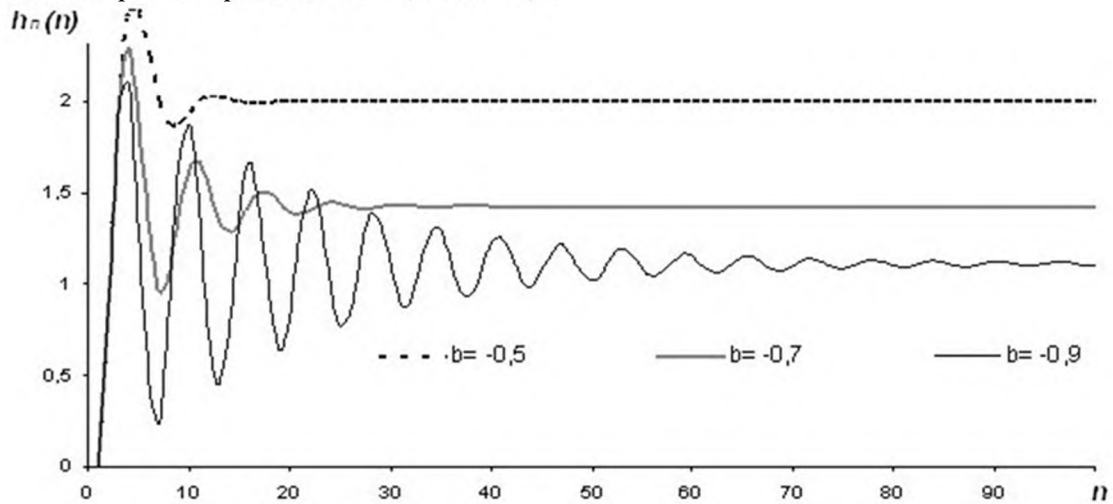
Поскольку в крупных корпоративных сетях присутствуют задержки сигнальной и управляющей информации, такие системы можно отнести к классу дискретных систем с запаздыванием [1]. Системы с задержанной обратной связью адекватно описываются дифференциальными уравнениями с отклоняющимся аргументом [4]. Тогда, в соответствии с общей теорией управления [2], процессы обмена информацией между управляемыми объектами и системой управления могут быть описаны дифференциально-разностными уравнениями или уравнениями с отклоняющимися аргументами вида

$$y_{as_i}(n) \approx y_{as_i}(n-1) + b_i y_{as_i}(n-k) + u_i(n-m), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

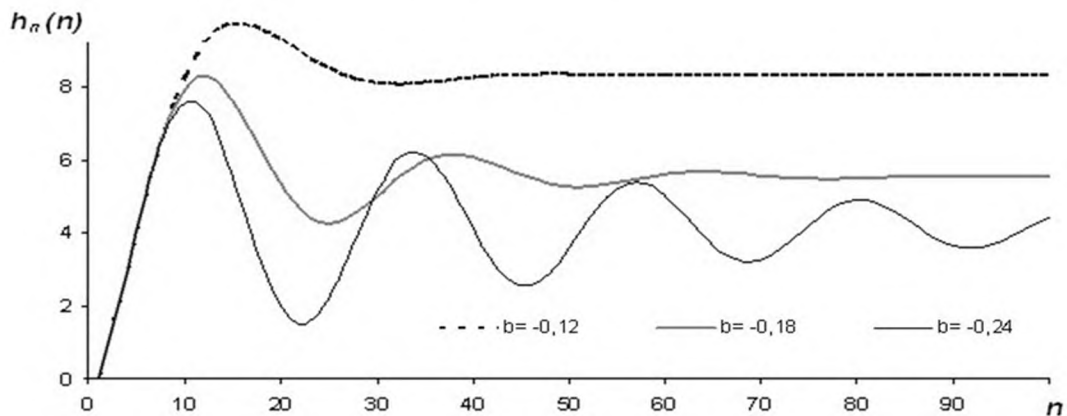
где $y_{as}(n)$ – функция состояния объекта; $u(n-m)$ – управляющий сигнал; k и m являются задержками сигналов состояния и управления соответственно. В общем случае $n \neq m$.

Исследование асимптотической устойчивости системы управления по переходной характеристике. Чтобы оценить асимптотическую устойчивость системы управления сетью необходимо проанализировать ее переходную характеристику при различных значениях задержки сигнальной k информации и коэффициента обратной связи (b_i).

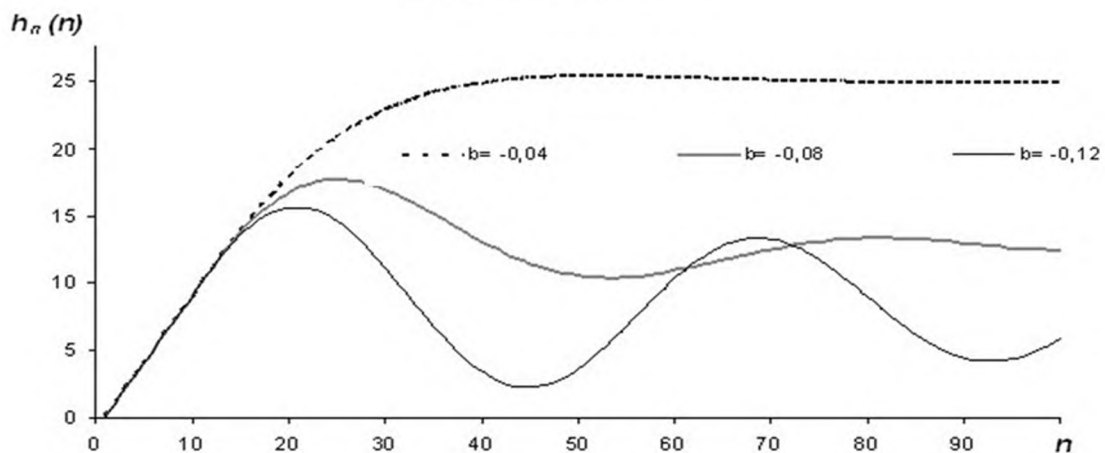
На рис. 1 изображены графики переходных характеристик системы с задержкой информационного сигнала на 2, 6 и 12 элементарных интервалов. Коэффициенты b_i менялись в широких пределах от $-0,04$ до $-0,9$.



а) задержка сигнала $k=2$



б) задержка сигнала $k=6$



в) задержка сигнала $k=12$

Рис. 1. Переходные характеристики системы с постоянным запаздыванием информационного сигнала и различных коэффициентах обратной связи

Как видно из графиков, при незначительной задержке информационного сигнала ($k=2$) система остается устойчивой в широком диапазоне значений коэффициента обратной связи до значения $|b_i| \leq 0,8$.

При увеличении задержки сигнала (рис. 1 б, в) устойчивость системы наблюдается только при малых значениях коэффициента обратной связи $|b_i| \leq 0,2$ и $|b_i| \leq 0,1$, соответственно. Т.е., имеется обратно-пропорциональная зависимость между величиной задержки сигнала и значением коэффициента обратной связи. Следует отметить, что при положительных и отрицательных значениях коэффициента b_i имеют место схожие закономерности изменения переходных характеристик.

На рис. 2. представлены переходные характеристики системы управления с постоянным коэффициентом обратной связи $b = -0,1$ и запаздыванием информационного сигнала на 4, 12 и 20 элементарных периодов.

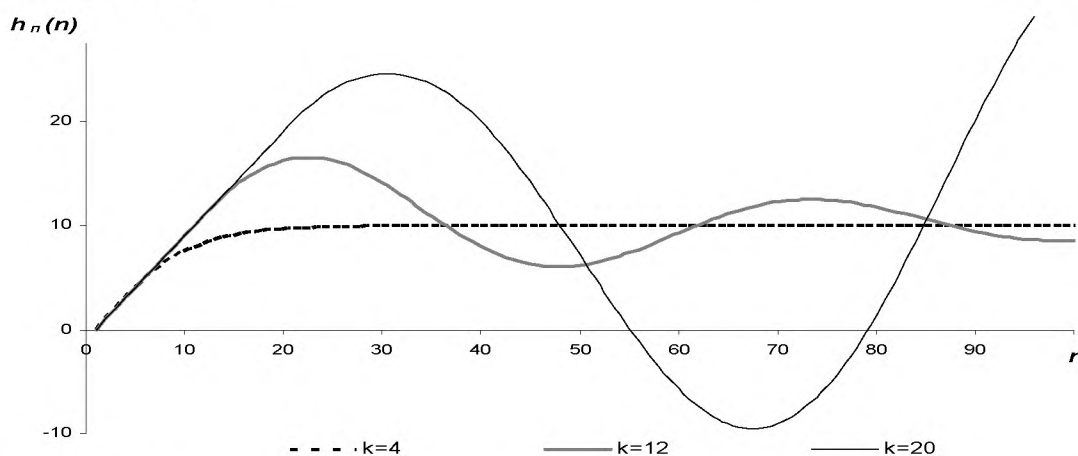


Рис. 2. Переходные характеристики системы с постоянным коэффициентом обратной связи ($b = -0,1$) и различным запаздыванием информационного сигнала

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод: чем больше задержка в цепи обратной связи (соответственно, чем выше степень полинома знаменателя системной функции), тем при меньших абсолютных значениях коэффициента в цепи обратной переходная характеристика становится расходящейся, т.е. система неустойчива.

Оценка запаса устойчивости и быстродействия системы управления по переходной характеристике. Оценка запаса устойчивости и быстродействия можно произвести по виду кривой переходного процесса в системе автоматического управления при входном воздействии, в виде единичного скачка [2].

Склонность системы к колебаниям, а, следовательно, и запас устойчивости могут быть охарактеризованы максимальным значением управляемой величины y_{\max} или так называемым перерегулированием $\sigma\% = \frac{y_{\max} - y_{\text{уст.}}}{y_{\text{уст.}}} \cdot 100\%$, где y_{\max} и $y_{\text{уст.}}$ – максимальное и установившееся значение выходной характеристики, соответственно.

При малом запасе устойчивости системы управления ее собственные колебания затухают медленно, и перерегулирование в переходном режиме получается значительным.

Допустимое значение перерегулирования для системы обычно устанавливается на основании опыта эксплуатации подобных систем. В большинстве случаев считается, что запас устойчивости является достаточным, если величина перерегулирования не превышает 10...30%. Однако в некоторых случаях требуется, чтобы переходный процесс протекал вообще без перерегулирования, т.е. был монотонным; в ряде других случаев может допускаться перерегулирование 50...70%.

Быстродействие системы может определяться по длительности переходного процесса. Длительность переходного процесса определяется как промежуток времени с момента приложения на вход единичного скачка до момента перехода системы в установившийся режим с выходным значением $u_{уст.}$

В табл. 1 представлены значения величины перерегулирования и быстродействия системы управления при различных коэффициентах обратной связи b_i и значениях задержки информационного сигнала k .

Табл. 1

Задержка k	Динамическая характеристика	Коэффициент обратной связи b_i				
		-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9
$k=2$	Величина перерегулирования δ , %	25%	44%	61%	76%	89%
	Длительность переходного процесса, n	10	20	30	40	80
$k=6$	Величина перерегулирования δ , %	17%	33%	50%	68%	83%
	Длительность переходного процесса, n	27	45	63	80	150
$k=12$	Величина перерегулирования δ , %	2%	19%	44%	93%	98%
	Длительность переходного процесса, n	40	68	100	150	265

Как видно из таблицы, удовлетворительный запас устойчивости и быстродействие системы наблюдается при небольших задержках информации в широком диапазоне значений коэффициентов обратной связи, и наоборот, увеличение времени задержки информации позволяет обеспечить запас устойчивости и необходимое быстродействие только при небольших коэффициентах $|b_i| \leq 0,1$.

Оценка асимптотической устойчивости системы на основе информации о положении полюсов. Исследования только передаточных характеристик для оценки асимптотической устойчивости исследуемой системы недостаточно. Асимптотическая устойчивость дискретных систем определяется расположением полюсов системной функции внутри единичной окружности z -плоскости [2]. Поэтому необходимо исследовать поведение полюсов системной функции, т.е. корней полинома ее знаменателя.

Выполнив z -преобразование для (3), получим выражение для системной функции:

$$H(z) = \frac{z^{-m}}{1 - z^{-1} - b_i z^{-k}} \quad (4)$$

Полюсами системной функции $H(z)$ являются корни полинома знаменателя. Поскольку параметр m находится в числителе системной функции $H(z)$, то, очевидно, на устойчивость системы управления он не влияет. Поэтому будем рассматривать только влияние задержки сигнальной информации и коэффициента обратной связи на устойчивость системы.

Умножив обе части полинома знаменателя $1 - z^{-1} - b_i z^{-k} = 0$ на z^k , получим уравнение

$$z^k - z^{k-1} - b_i = 0, \quad (5)$$

которое представляет собой характеристический полином уравнения (3).

В соответствии с основной теоремой высшей алгебры полином k -го порядка с вещественными коэффициентами имеет ровно k корней, которые могут быть вещественными или представлять собой комплексно сопряженные пары. Поэтому исчерпывающую информацию об устойчивости могут дать модули этих корней.

Для анализа устойчивости системы управления были рассчитаны значения коэффициента обратной связи b_i , при котором система остается на границе устойчивости, т.е. один из полюсов системной функции (4) лежит на единичной окружности ($z_v = 1$). При этом изменялись значения запаздывания информационного сигнала k . По результатам

расчетов был построен график области устойчивости системы с запаздыванием сигнала при различных коэффициентах обратной связи, представленный на рис. 3.

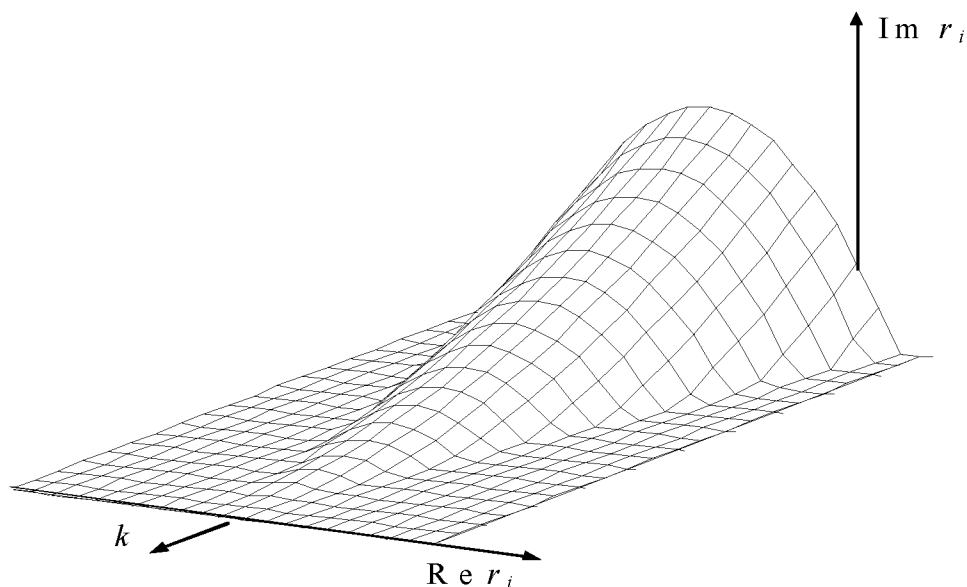


Рис. 3. Область устойчивости системы управления с задержками информационного сигнала

Проанализировав график можно сделать вывод, что устойчивость системы управления, описываемой уравнением (3) при увеличении задержки информационного сигнала сохраняется только при снижении коэффициента обратной связи. Например, в случае задержки сигнала менее чем на 4 элементарных интервала система остается устойчивой в широком диапазоне значений b_i . Однако, для поддержания устойчивости системы при задержке сигнала более чем на 10 интервалов необходимо соблюдать условие $|b_i| \ll 0,2$, т.е., система становится слабо управляемой. Поэтому необходимо контролировать задержки доставки служебной информации и принимать меры для их уменьшения.

Относительно задачи управления сетью особенностью функции (4) является то, что степень полинома знаменателя и, соответственно, уравнения (5) определяется задержкой информационного сигнала k . В реальной сети задержка доставки данных является случайной величиной, а ее среднеквадратическое отклонение меняется в довольно широких пределах [5].

В сложных системах имеет место эффект нормализации случайных параметров протекающих процессов, причем вероятностное распределение тем ближе к гауссовскому, чем больше масштаб системы [6, 7]. Поэтому можно утверждать, что распределение задержек доставки данных с достаточной точностью описывается гауссовским законом.

Одним из методов обеспечения глобальной устойчивости системы управления является текущий контроль и принудительное введение системы в области устойчивости путем целенаправленного изменения ее коэффициентов обратной связи. При этом в процессе регулирования устойчивости необходимо обеспечивать сохранение динамических характеристик системы.

Выводы. Сложность управления крупными корпоративными сетями заключается в наличии случайных задержек управляющей и сигнальной информации, неполноте априорной информации о параметрах и состоянии сетевого оборудования. Это может приводить к осцилляциям нагрузки на сетевые узлы и потере устойчивости системы управления.

1. Для эффективного управления такими сетями необходимо контролировать устойчивость системы управления при различном значении задержки информации путем изменения коэффициентов обратной связи.

2. Проведенный анализ асимптотической устойчивости системы по ее переходным характеристикам, позволяет сделать вывод: чем больше задержка в цепи обратной связи, тем

при меньших абсолютных значениях коэффициента в цепи обратной переходная характеристика становится расходящейся, т.е. система неустойчива.

3. По результатам исследования полюсов системной функции построен график области устойчивости системы при различных значениях запаздывания сигнала и коэффициентах обратной связи. Для поддержания устойчивости системы при запаздывании сигнала более чем на 10 интервалов рекомендуется выбирать коэффициент обратной связи исходя из условия $|b_i| \ll 0,2$.

Литература

1. Савченко А.С. Концептуальная модель системы управления крупной корпоративной сетью / А.С. Савченко // Проблемы інформатизації та управління: зб. наук. праць. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 2(34). – С. 120-128.
2. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 3-е. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
3. Справочник по теории автоматического управления ; под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.
4. Эльсгольц Л.Э. Введение в теорию дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом / Л.Э. Эльсгольц, С.Б. Норкин. – М.: Наука, 1971. – 296 с.
5. Столлингс В. Современные телекоммуникационные сети / В. Столлингс. – Изд. 2-е. – СПб.: Питер, 2003. – 783 с.
6. Казаков И.Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой / И.Е. Казаков. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
7. Савченко А.С. Экспериментальное исследование свойств суммарных потоков в вычислительных сетях / А.С. Савченко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2010. – №.4(16). – С.101-107.