

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-3>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/109TVN316.pdf>

Статья опубликована 29.06.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Хабибулин Н.Ф., Шкердин А.Н., Щербенко А.Н. Повышение пропускной способности систем передачи с переспросом за счет введения дополнительной связи между процессами декодирования с исправлением и обнаружением ошибок // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/109TVN316.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.321

Хабибулин Наиль Фаритович

ГКОУ ВПО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», Россия, Орел¹
Кандидат технических наук, сотрудник
E-mail: nail_khabib@mail.ru

Шкердин Андрей Николаевич

ГКОУ ВПО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», Россия, Орел
Кандидат технических наук, сотрудник
E-mail: andy_shans@mail.ru

Щербенко Александр Николаевич

ГКОУ ВПО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», Россия, Орел
Сотрудник
E-mail: khv_alexandr@mail.ru

Повышение пропускной способности систем передачи с переспросом за счет введения дополнительной связи между процессами декодирования с исправлением и обнаружением ошибок

Аннотация. В современных системах передачи качественный прием сообщений обеспечивается использованием процесса декодирования совместно с процессом обнаружения ошибок системы переспроса. Применение системы переспроса приводит к снижению суммарной пропускной способности системы передачи. В ряде случаев, снижение пропускной способности является критичным для систем, функционирующих в режиме реального времени (к примеру, при передаче потокового видео). Для сохранения скорости передачи авторами предлагается реализовать модификацию процесса декодирования путем введения дополнительной связи от процесса обнаружения ошибок. Применение обратной связи может быть эквивалентно формированию из исходного корректирующего кода – кода с выбрасыванием. Этот код возможно образовать с помощью порождающей матрицы, полученной в результате умножения порождающих матриц, обнаруживающего и корректирующего кодов. Свойства кода с выбрасыванием оцениваются рядом критериев. В результате анализа устанавливается, что код с выбрасыванием обладает лучшими характеристиками по сравнению с исходным корректирующим кодом. Измененные возможности канального декодера продемонстрированы расчетными и экспериментальными

¹ 302034, г. Орел, ул. Приборостроительная, 35

значениями. Основываясь на представленных результатах, авторы делают вывод о том, что введение дополнительной обратной связи позволяет усилить возможности канального декодера по локализации и исправлению ошибок.

Ключевые слова: пропускная способность систем передачи; система переспроса; вероятность искажения принятого кадра; процесс декодирования; процесс обнаружения ошибок; дополнительная обратная связь; код с выбрасыванием; порождающая матрица кода с выбрасыванием

Современное состояние развития телекоммуникационных систем характеризуется высокой степенью интеграции сетей связи и расширением набора предоставляемых пользователю услуг. Это приводит к интенсивному развитию сетей связи в направлении увеличения скорости информации и, соответственно, к снижению энергии, приходящейся на передаваемый бит.

В свою очередь, широкое применение пользователями сети алгоритмов сжатия данных повышает требования к достоверности транслируемой информации. Эти причины обуславливают тот факт, что список помехоустойчивых кодов, традиционно используемых в системах передачи, продолжает пополняться [1].

Результатирующее требование по достоверности передаваемой информации в системах с пакетной коммутацией достигается за счет применения механизмов обнаружения и запроса искаженного кадра по каналу обратной связи – систем переспроса (*Automatic Repeat-request, ARQ*). В качестве проверочных последовательностей процессов обнаружения ошибок наиболее часто применяется контрольная сумма и проверка с использованием циклического избыточного кода (*Cyclic Redundancy Check, CRC*).

Вместе с тем применение *ARQ* систем приводит к снижению суммарной пропускной способности системы передачи. Изменение пропускной способности оценивается по доле искаженно принятых кадров.

Согласно [2] вероятность искажения переданного кадра длиной n бит в двоичном симметричном канале без памяти (ДСКБП) при независимом появлении ошибок может быть рассчитана с помощью выражения биномиального закона распределения:

$$P = \sum_{i=1}^n C_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i}, \quad (1)$$

где: n – количество бит в переданном кадре; C_n^i – число сочетаний из i по n , p – вероятность битовой ошибки в канале связи.

Доля искаженно принятых кадров из N переданных, выраженная в процентах, будет равна:

$$P_{\text{иск}} = \left(\sum_{i=1}^n C_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

В ряде случаев, применение *ARQ* системы является критичным для систем, функционирующих в режиме реального времени. К примеру, в процессе передачи потокового видео требуется обеспечить компромисс между поддержанием постоянной пропускной способности канала связи и качественным приемом сообщений [3, 4].

В этих системах для сохранения скорости передачи, и соответственно уменьшения количества переспросов, на приемной стороне предлагается реализовать модификацию процесса декодирования путем введения дополнительной связи от процесса обнаружения ошибок. Структурная схема системы передачи информации с применением дополнительной обратной связи между каскадами обработки представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Структурная схема системы передачи информации с применением дополнительной обратной связи между каскадами обработки (рисунок разработан авторами на основе материалов [5, 6])

Модификация процесса декодирования может быть представлена следующим образом. Первоначально, в блоке 7 производится декодирование принятых векторов. Далее, в блоке 8 выполняется проверка кадров ARQ системы на наличие ошибок. При обнаружении искаженного кадра в канальный декодер с использованием дополнительной связи передается запрет кодового вектора с целью расширенного повторного декодирования. В этом случае применение дополнительной обратной связи может быть эквивалентно формированию из исходного корректирующего кода – кода с выбрасыванием [5].

В соответствии с [7] код с выбрасыванием не поддается конструктивному описанию в алгебраической теории кодов, поэтому для оценки свойств такого кода может быть использован переборный метод. Как показано в [8, 9] кадр ARQ системы по рекомендации международного союза электросвязи V.41 представляется в виде кодового слова обнаруживающего линейного блочного кода. В этом случае характеристики кода с выбрасыванием предлагается рассмотреть на примере синхронного размещения линейных блочных кодов короткой длины – корректирующего кода БЧХ (15,7) и обнаруживающего кода Хэмминга (7,4) (см. рисунок 2).

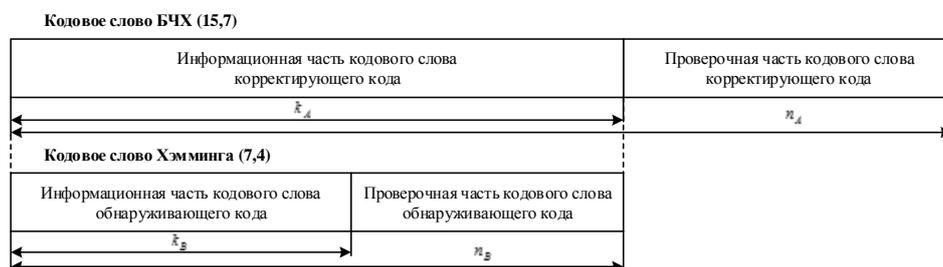


Рисунок 2. Структурная схема размещения кодовых слов обнаруживающего и корректирующего кодов (рисунок разработан авторами)

Процесс формирования кода с выбрасыванием может быть описан с помощью порождающей матрицы, полученной в результате умножения порождающих матриц обнаруживающего и корректирующего кодов:

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_B \times \mathbf{G}_A = [\mathbf{I}^{k_B \times k_B} \mid \mathbf{P}^{k_B \times (n_B - k_B)} \mid \mathbf{P}^{k_B \times (n_A - k_A)}], \quad (3)$$

где: k_B – количество символов информационной части кодового слова обнаруживающего кода; n_B – количество символов кодового слова обнаруживающего кода; k_A – количество символов информационной части кодового слова корректирующего кода; n_A – количество символов кодового слова корректирующего кода; \mathbf{G}_B – порождающая матрица обнаруживающего кода; \mathbf{G}_A – порождающая матрица корректирующего кода; $\mathbf{I}^{k_B \times k_B}$ – информационная подматрица; $\mathbf{P}^{k_B \times (n_B - k_B)}$ – проверочная подматрица обнаруживающего кода; $\mathbf{P}^{k_B \times (n_A - k_A)}$ – модифицированная проверочная подматрица корректирующего кода.

Анализ характеристик кода с выбрасыванием, представленной в виде корректирующего кода с выбрасыванием, предлагается производить по следующим критериям:

- кодовому расстоянию [5]:

$$d_{\min} = \min_{j \neq l} \{d(v_j, v_l)\}, \quad (4)$$

- весовому спектру (спектру расстояний);
- вероятности необнаруженной ошибки [10]:

$$P_{\text{ош}}^{\text{но}} = \sum_{l=d_{\min}}^{n_A} A_l \cdot p^l \cdot (1-p)^{n-l}, \quad (5)$$

где: l – вес вектора ошибок; A – весовые коэффициенты кода; P – вероятность битовой ошибки в канале связи;

- количеству исправляемых векторов ошибок различного веса.

Сравнительная оценка характеристик корректирующего кода с выбрасыванием с исходным кодом на примере кодов БЧХ (15,7) и Хэмминга (7,4) приведена в таблице 1.

Таблица 1
Сравнение характеристик исходного кода и кода с выбрасыванием

Наименование	Код БЧХ (15,7)	Код с выбрасыванием БЧХ (15,7)
Минимальное кодовое расстояние	$d_{\min} = 5$	$d_{\min} = 5$
Весовой спектр кода		
Вероятность необнаруженной ошибки	$P_{\text{ош}}^{\text{но}}$ (при $p = 10^{-2}$) = $1,6554 \cdot 10^{-9}$ $P_{\text{ош}}^{\text{но}}$ (при $p = 10^{-3}$) = $1,7851 \cdot 10^{-14}$ $P_{\text{ош}}^{\text{но}}$ (при $p = 10^{-4}$) = $1,7985 \cdot 10^{-19}$ $P_{\text{ош}}^{\text{но}}$ (при $p = 10^{-5}$) = $1,7999 \cdot 10^{-24}$	$P_{\text{ош}}^{\text{но}}$ (при $p = 10^{-2}$) = $2,7406 \cdot 10^{-10}$ $P_{\text{ош}}^{\text{но}}$ (при $p = 10^{-3}$) = $2,9731 \cdot 10^{-15}$ $P_{\text{ош}}^{\text{но}}$ (при $p = 10^{-4}$) = $2,9973 \cdot 10^{-20}$ $P_{\text{ош}}^{\text{но}}$ (при $p = 10^{-5}$) = $2,9997 \cdot 10^{-25}$

Наименование	Код БЧХ (15,7)	Код с выбрасыванием БЧХ (15,7)
Возможности корректирующего кода по исправлению векторов ошибок различного веса		

Так как кодовое расстояние корректирующего кода с выбрасыванием не изменяется, то основной характеристикой, позволяющей сравнивать помехоустойчивые коды, является весовой спектр. Числовые значения вероятности необнаруженной ошибки, рассчитанные с помощью весовых коэффициентов, показывают, что код с выбрасыванием обладает более высокой исправляющей способностью. Это подтверждается количеством исправляемых векторов ошибок, полученных путем табличного перебора.

Доля искаженных векторов кода БЧХ (15,7) и кода с выбрасыванием БЧХ (15,7) после процесса декодирования вычисляется с использованием выражения:

$$P_{иск} = \left(\sum_{i=t+1}^{n_A} C_{n_A}^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{n_A-i} \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

где t – исправляющая способность кода.

Однако, так как исследуемые коды позволяют корректировать часть векторов ошибок с весом, превышающим исправляющую способность кода $t = 2$, то доля искаженных векторов этих кодов $P_{иск\text{мод}}$ может быть рассчитана следующим образом:

$$P_{иск\text{мод}} = ((1-k_{t+1}) \cdot P_{t+1} + (1-k_{t+2}) \cdot P_{t+2} + \dots + (1-k_{n_A}) \cdot P_{n_A}) \cdot 100\% \quad (7)$$

где k_i – доля исправляемых векторов ошибок весом i от общего количества векторов ошибок веса i .

Для корректирующего кода БЧХ (15,7) и кода с выбрасыванием БЧХ (15,7) с использованием выражения (7) рассчитана оценка доли искаженных векторов после процесса декодирования (см. рисунок 3). Количественные значения получены при изменении вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума (E_b/N_0) для ДСКБП.

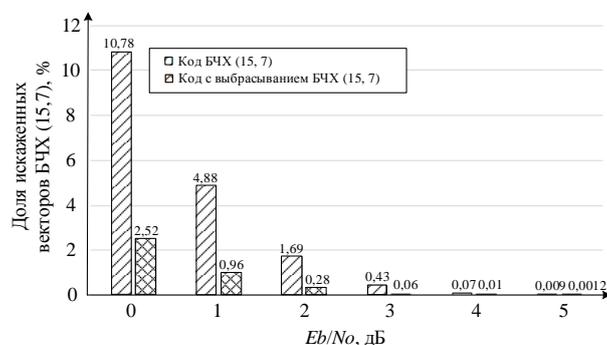


Рисунок 3. Расчетная оценка доли искаженных векторов БЧХ (15,7) от E_b/N_0 (рисунок разработан авторами)

Проверка рассчитанных результатов проводилась с помощью натурального моделирования. При проведении натурального моделирования учитывалось, что, в соответствии с теоремой Лапласа (выражения 8 - 9) [11], для получения вероятности битовой ошибки после процесса декодирования равной $p = 1 \cdot 10^{-5}$ при относительной погрешности $\varepsilon = 10^{-6}$ и вероятности наступления события $P_c = 0,95$ по каналу связи требуется передать не менее $n = 38415616$ бит, что составляет $N = 2561041$ кодовых слов БЧХ (15,7):

$$P_c \approx 2\Phi\left(\frac{\varepsilon \cdot n}{\sqrt{n \cdot p \cdot (1-p)}}\right), \quad (8)$$

$$n \approx \frac{(2 \cdot P_c)^2 \cdot p \cdot (1-p)}{\varepsilon^2}, \quad (9)$$

где: P_c – вероятность наступления события; ε – погрешность отклонения относительной частоты от вероятности битовой ошибки.

Натурное моделирование заключалось в кодировании требуемого объема информационных последовательностей i длины k_B при использовании выражения (3). Далее последовательность кодовых бит искажалась по биномиальному закону распределения ошибок в канале связи с изменением отношения сигнал/шум в диапазоне от 3 дБ до 8 дБ, что с учетом квадратурной фазовой модуляции (выражение (10)) соответствует изменению E_b/N_o от 0 дБ до 5 дБ:

$$E_b / N_o = S / N - 10 \cdot \log_{10}(M), \quad (10)$$

где: S/N – отношение мощности сигнала к мощности шума; M – индекс модуляции (при квадратурной фазовой модуляции $M = 2$).

В последствии искаженная последовательность декодировалась с использованием синдромного алгоритма декодирования БЧХ (15,7) и синдромного алгоритма декодирования кода с выбрасыванием БЧХ (15,7), в которых рассчитанной величине синдрома ставилось в соответствие наиболее вероятная комбинация ошибок. Результаты моделирования по оценке доли искаженных векторов для кода с выбрасыванием БЧХ (15,7) и исходного кода в зависимости от E_b/N_o представлены на рисунке 4.

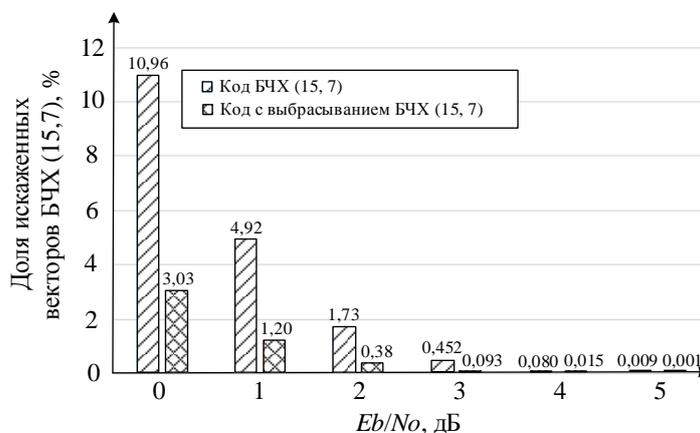


Рисунок 4. Зависимость доли искаженных векторов БЧХ (15,7) от отношения от E_b/N_o (рисунок разработан авторами)

На рисунке 5 для исследуемых кодов представлен сравнительный анализ расчетных значений и результатов моделирования.

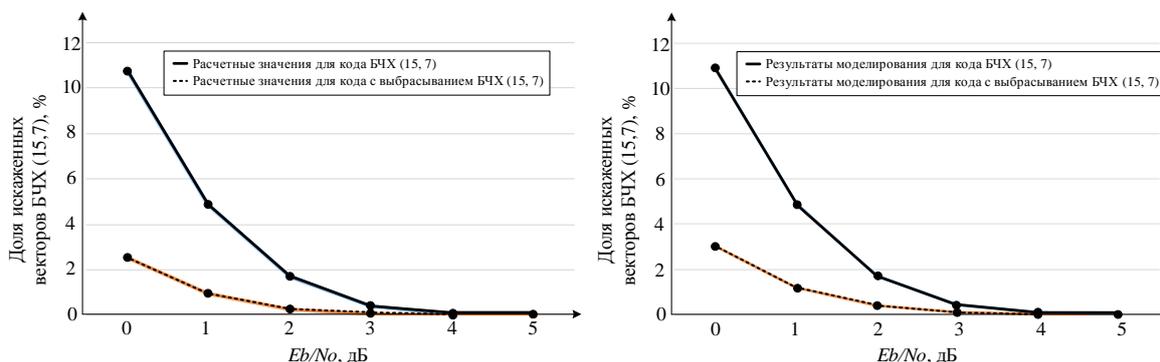


Рисунок 5. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных результатов для кода БЧХ (15,7) и кода с выбрасыванием БЧХ (15,7) (рисунок разработан авторами)

Обоснованность требуемого объема выборки при проведении эксперимента, а также малая величина относительной погрешности расчетных и экспериментальных значений показывают, что моделирование искажений ДСКБП и процессов декодирования исследуемых кодов является корректным.

Таким образом, введение дополнительной обратной связи от процесса обнаружения ошибок ARQ системы к процессу декодирования позволяет усилить возможности канального декодера по локализации и исправлению ошибок. В настоящих условиях высокая производительность современных специализированных вычислителей дает возможность использовать предлагаемое решение для повышения пропускной способности систем передачи с переспросом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарев, Ю.Б. Овечкин, Г.В. Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // Электросвязь. 2008. №12. С. 58-61.
2. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2000. – 383 с.
3. Башун, В.В. Сергеев, А.В. Модель и протокол передачи видеоданных в реальном времени по беспроводному каналу // Информационно-управляющие системы. 2007. №6. С. 20-27.
4. Павлов, М.М., Абилов, А.В. Оценка эффективности алгоритма *ARQ* при передаче потоковых данных в *WLAN* // Телекоммуникации и Транспорт. 2012. №7. С. 141-145.
5. Блейхут, Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки: пер. с англ. М.: Мир, 1986. 576 с.
6. Кларк, Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи М.: Радио и связь. 1987. 392 с.
7. Берлекэмп, Э. Алгебраическая теория кодирования. Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 477 с.
8. Хабибулин, Н.Ф. Шкердин, А.Н. Методика исправления искаженных кадров *ARQ* // НПК XXII ВНК в/ч 25714. 1999.
9. Хабибулин, Н.Ф. Возможность исправления ошибок при использовании полиномиальной проверки // Сборник материалов НТК ВАС СПб., 1997. С. 142–144.
10. Мак-Вильямс, Ф.Дж. Слоэн, Н.Дж. Теория кодов, исправляющих ошибки: пер. с англ. М.: Связь. 1979. 744 с.
11. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика М.: Высш. Школа, 2004.

Khabibulin Nail Faritovich

The Academy of the federal guard service of the Russian Federation, Russia, Orel
E-mail: nail_khabib@mail.ru

Shkerdin Andrey Nikolaevich

The Academy of the federal guard service of the Russian Federation, Russia, Orel
E-mail: andy_shans@mail.ru

Scherbenko Alexandr Nikolaevich

The Academy of the federal guard service of the Russian Federation, Russia, Orel
E-mail: khv_alexandr@mail.ru

The repeat-request transmission systems throughput increase using the additional connection between the error correction and error detection processes

Abstract. In the modern transmission systems required reliability of the information translation is achieved by the common application of the decoding process and the error detection process of the automatic repeat-request system. The application of the automatic repeat-request system leads to the total throughput decrease. Sometimes the throughput decrease may be critical in case of the real time systems (for example, while the streaming video is transmitted). For the purpose of the constant bitrate maintenance the authors propound to modify the decoding process using the additional connection from the error detection process. The feedback application may be equal to the transition from the base error correction code to the expurgated code. Such code can be formed by the generator matrix achieved by the multiplication of the generator matrices of the error detection and the error correction codes. The expurgated code properties are estimated by a set of criteria. As an analysis result the superiority of such expurgated code above the initial forward error correction code is showed. The modified performance of the channel decoder is demonstrated by the calculated and experimental values. Relying on the represented results the authors conclude the performance increase using the additional feedback connection that allows the channel decoder to localize and to correct errors.

Keywords: transmission systems throughput; repeat-request system; frame error rate; decoding process; error detection process; additional feedback; expurgated code; expurgated generator matrix

REFERENCES

1. Zubarev, Yu.B. Ovechkin, G.V. Pomekhoustoychivoe kodirovanie v tsifrovyykh sistemakh peredachi dannykh // *Elektrosvyaz'*. 2008. №12. S. 58-61.
2. Venttsel', E.S. Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya: ucheb. posobie dlya vuzov / E.S. Venttsel', L.A. Ovcharov. – 2-e izd., ster. – M.: Vysshaya shkola, 2000. – 383 s.
3. Bashun, V.V. Sergeev, A.V. Model' i protokol peredachi videodannykh v real'nom vremeni po besprovodnomu kanalu // *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2007. №6. S. 20-27.
4. Pavlov, M.M., Abilov, A.V. Otsenka effektivnosti algoritma ARQ pri peredache potokovykh dannykh v WLAN // *Telekommunikatsii i Transport*. 2012. №7. S. 141-145.
5. Bleykhut, R. Teoriya i praktika kodov, kontroliruyushchikh oshibki: per. s angl. M.: Mir, 1986. 576 s.
6. Klark, Dzh. Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemakh tsifrovoy svyazi M.: Radio i svyaz'. 1987. 392 s.
7. Berlekemp, E. Algebraicheskaya teoriya kodirovaniya. Per. s angl. M.: Mir, 1971. 477 s.
8. Khabibulin, N.F. Shkerdin, A.N. Metodika ispravleniya iskazhennykh kadrov ARQ // *NPK XXII VNK v/ch 25714*. 1999.
9. Khabibulin, N.F. Vozmozhnost' ispravleniya oshibok pri ispol'zovanii polinomial'noy proverki // *Sbornik materialov NTK VAS SPb.*, 1997. S. 142–144.
10. Mak-Vil'yams, F.Dzh. Sloen, N.Dzh. Teoriya kodov, ispravlyayushchikh oshibki: per. s angl. M.: Svyaz'. 1979. 744 s.
11. Gmurman, V.E. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika M.: Vyssh. Shkola, 2004.