

**ТРАНСФОРМАЦИЯ КОМБИНАЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН КОДА В ПРОЦЕССЕ  
ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ***Брынза А.А.**Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, РФ**E-mail: abrynza73@gmail.com*

В данной работе проводится глубокий анализ и оценка эффективности работы механизмов трансформации непроизводительных комбинаций декодера перестановочного декодирования. Это исследование имеет ключевое значение для оптимизации процессов, связанных с преобразованием элементов полного списка непроизводительных перестановок нумераторов в элементы полного списка производительных перестановок нумераторов. В рамках работы рассматриваются различные подходы к реализации процедуры перестановки запрещенных нумераторов, что позволяет выявить сложности и трудности, возникающие при кодировании для различных длин кодов. Особое внимание уделяется анализу алгоритмических аспектов и временной сложности, что позволяет не только оценить эффективность предложенных методов, но и выявить потенциальные узкие места в существующих решениях. Исследование также включает в себя сравнение различных стратегий и алгоритмов, что способствует более глубокому пониманию процесса декодирования и трансформации перестановок.

**Ключевые слова:** перестановочное декодирование, эквивалентный код, производительная перестановка, непроизводительная перестановка, интервальный вектор

**Введение**

Основной характеристикой современных интеллектуальных систем измерения и управления является их интеграция в телекоммуникационные технологии. Важнейшими аспектами этого процесса являются разработка беспилотных транспортных средств, управление роботами, дистанционное наблюдение и навигация. В ближайшем будущем значительное внимание будет уделено методам проектирования систем управления для сложных динамических объектов. В таких системах управление невозможно отделить от измерений и сопоставления реальных параметров с целевыми значениями, что необходимо для снижения степени неопределенности. В этом случае знание комбинаторных особенностей перестановок символов кодовых векторов играет важную роль в реализации алгоритма их декодирования, который во многом опирается на орбитальную структуру представления перестановок [1–5]. Особое внимание следует уделить работе с множеством непроизводных решений [6–9].

Процесс трансформации непроизводительных комбинаций (НПН) к производительному виду (ППН) является важнейшей составляющей перестановочного декодера. Целью работы является разработка оптимальных алгоритмов трансформации элементов множества непроизводных пе-

рестановок к множеству производных перестановок в системе перестановочного декодирования и оценка временных рамок выполнения процессов.

**Назначение перестановок в множестве  
непроизводительных комбинаций**

Эффективность системы перестановочного декодирования (ПД) неразрывно связана с числом кодовых комбинаций, с которыми может работать декодер. Как показано в таблице 1, для любого двоичного кода наблюдаются комбинации, которые не могут породить информационную обратную матрицу, используемую для восстановления изначального вектора, вследствие нулевого значения детерминанта. В простом случае – такие комбинации можно было бы исключить из системы ПД, и выдавать отказ, каждый раз, когда декодеру приходилось бы работать с комбинацией из непроизводного множества.

Если мы принимаем такое решение, то с увеличением длины кода мы будем сталкиваться с отказами все чаще, что неприемлемо для современных систем связи, требующих быстродействия и надежности. Выходом из ситуации служит разработка алгоритмов быстрой трансформации комбинации НПН к ППН [10]. Концепция трансформации следующая: в когнитивной карте НПН в формате ключ-значение хранится информация о непроизводительных перестановках, это такие

символы, производя замену которых на условленных позициях исходной НПН комбинации, новая комбинация, образованная перестановкой, не покинет множество НПН, а перейдет в другую непроемную комбинацию.

Таблица 1. Соотношений производительных и непроемных образующих комбинаций кодов разных размеров

| Используемый код       | ППН | НПН |
|------------------------|-----|-----|
| Хэмминга код (7, 4, 3) | 80  | 20  |
| Код БЧХ (14, 5, 7)     | 56  | 44  |
| Код БЧХ (15, 5, 7)     | 62  | 38  |
| Код БЧХ (15, 7, 5)     | 51  | 49  |
| Код Голя (23, 12, 7)   | 52  | 48  |
| Код Голя (18, 7, 7)    | 52  | 48  |

Поскольку образующие комбинации обреты (ОКО) цикличны, и всегда начинаются с единицы, то рационально замене подвергать последние позиции комбинации, так, при восстановлении лексикографического порядка новой комбинации – мы заведомо перейдем в другое ОКО, так как будет соблюдено свойство ОКО – единица на первой позиции. В качестве кандидатов для перестановки будут выступать позиции принятого сообщения, отсортированные по убыванию их индексов надежности [11; 12]. В работе будет подробно показан процесс трансформации НПН к ППН на примере кодов БЧХ (15, 5, 7) и БЧХ (15, 7, 5) (Коды Боуза – Чоудхури – Хоквингема).

### Трансформация непроемных комбинаций к производительному виду для кода БЧХ (15, 5, 7)

В процессе разработки карты НПН кода БЧХ (15, 5, 7) было определено несколько свойств, так, например, у ряда элементов НПН множество запрещенных перестановок последней позиции представлено всеми элементами проверочной части. Для таких элементов следует производить замену последних двух элементов для трансформации НПН в ППН. Также существуют пары элементов, замена на которые последних двух позиций НПН не приводит к трансформации в ППН.

На тестовой модели работы декодера, запущенной на процессоре с тактовой частотой 3,6 ГГц была произведена тестовая отправка десяти тысяч сообщений, закодированных с применением кода БЧХ (15, 5, 7), и было получено следующее распределение, показанное в таблице 2 и отраженное на рисунке 1.

Процесс трансформации можно описать в виде алгоритма:

1. Декодер находит в карте НПН исходную комбинацию и принимает на основании этого факта решение о том, что трансформация необходима.

2. На основании данных, полученных на приеме комбинации, декодер получает список запрещенных для перестановки групп символов.

3. Из запрещенного списка групп, получаем группы, которые могут быть использованы для перестановки на позиции нового ОКО.

4. Осуществляем перестановку путем замены нужного числа последних позиций кодового вектора на значения, полученные из списка пригодных для перестановки групп.

5. Вектор после перестановки символов заново сортируется по возрастанию, чтобы удовлетворять свойствам ОКО.

6. Происходит поиск в когнитивной карте (КК) ППН по новому значению ОКО, полученный объект КК передается дальше, для реализации дальнейшего процесса декодирования.

Таблица 2. Результаты декодирования 10000 сообщений декодером ПД кода БЧХ (15, 5, 7)

| Позиции, которые потребовали замены | Число комбинаций | Время на перестановку |         |         |
|-------------------------------------|------------------|-----------------------|---------|---------|
|                                     |                  | max, мс               | min, мс | avr, мс |
| Последний символ                    | 2973             | 6,796                 | 0,052   | 0,144   |
| Последние два символа               | 620              | 14,389                | 0,245   | 0,710   |

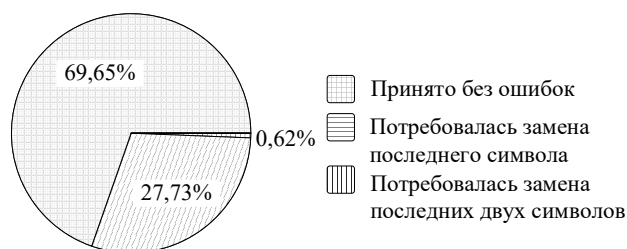


Рисунок 1. Распределение результатов работы декодера ПД по декодированию 10000 сообщений кода БЧХ (15, 5, 7)

### Трансформация непроемных комбинаций к производительному виду для кода БЧХ (15, 7, 5)

На тестовой модели работы была произведена аналогичная отправка десяти тысяч сообщений, закодированных с применением кода БЧХ (15, 7, 5), получено распределение из таблицы 3 и показано на рисунке 2. Как видно из таблицы 3, по сравнению с кодом БЧХ (15, 5, 7) в БЧХ (15, 7, 5) помимо замены последнего и последних

двух символов, замене также подвергаются и более объемные группы символов.

Описанный ранее алгоритм трансформации справедлив и для этого кода, и поскольку признак требуемой замены символов хранится в КК НППН, то декодеру в момент трансформации нет нужды в вычислении требуемого числа позиций перестановки.

Таблица 3. Результаты декодирования 10000 сообщений декодером ПД кода БЧХ (15, 7, 5)

| Позиции, которые потребовали замены | Число комбинаций | Время на перестановку |         |         |
|-------------------------------------|------------------|-----------------------|---------|---------|
|                                     |                  | max, мс               | min, мс | avr, мс |
| Последний символ                    | 3232             | 11,422                | 0,07    | 0,146   |
| Последние два символа               | 1440             | 13,416                | 0,152   | 0,299   |
| Последние три символа               | 531              | 17,199                | 0,203   | 0,421   |
| Последние четыре символа            | 23               | 17,246                | 0,318   | 1,241   |

### Сравнение результатов тестовой отправки сообщений

При равных настройках канала связи, исходя из визуализации на рисунках 1 и 2, можно понять, что в реальной системе связи, соотношение ПППН/НППН, показанное в таблице 1, будет непосредственно влиять на процент правильно принятых сообщений и решений о перестановках символов, принятых декодером.



Рисунок 2. Распределение результатов работы декодера ПД по декодированию 10000 сообщений кода БЧХ (15, 7, 5)

Как видно из таблиц 2 и 3, увеличение числа позиций для замены не вызывает резкого увеличения количества времени на выполнение процедуры замены позиции в комбинации, что в теории позволяет применять данный подход и для кодов с более смещенным в сторону НППН отношением ПППН/НППН. Кроме того, использование сокращенных кодов, как в случае с кодом

БЧХ (14, 5, 7), как отмечено в таблице 1, также может вести к смещению отношения производительных комбинаций в сторону непроизводительных. В таком случае, эффективные методы трансформации комбинации также будут занимать ведущую роль в реализации ПД.

### Заключение

В работе были продемонстрированы подходы к исправлению непроизводительных комбинаций для кодов БЧХ разной длины. Приведены временные выкладки, позволяющие судить о линейном увеличении сложности операций выполнения перестановок, в зависимости от длины кода и общего числа требуемых перестановок, что говорит о применимости данного метода для более объемных кодов.

### Литература

1. Гладких А.А. Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными // Электросвязь. 2017. № 8. С. 52–56.
2. Гладких А.А., Овинников А.А., Тамразян Г.М. Математическая модель когнитивного перестановочного декодера // Цифровая обработка сигналов. 2019. № 1. С. 14–19.
3. Coding methods and permutation decoding in the systems for network processing of data / A.A. Gladkikh [et al.] // International Journal of Control and Automation. 2020. Vol. 13, no. 1. P. 93–110.
4. Чилихин Н.Ю., Карпухина Е.К., Горюнов А.О. Разработка и интеграция адаптивного SCL декодера в аппаратную платформу FPGA Xilinx Artix-7 XC7A100T // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19, № 3. С. 357–365. DOI: 10.18469/ikt.2021.19.3.13
5. Питерсон У., Уэлден Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 594 с.
6. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005. 320 с.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
8. Гладких А.А., Наместников С.М., Пчелин Н.А. Эффективное перестановочное декодирование двоичных блоковых избыточных кодов // Автоматизация процессов управления. 2017. № 1 (47). С. 67–74.
9. Свойства циклических структур в системе перестановочного декодирования избыточных кодов / Н.Ю. Бабанов [и др.] // Автоматиза-

- ция процессов управления. 2020. № 2 (60). С. 101–108. DOI: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-101-108
10. Оценка эффективности защиты данных от ошибок на базе байесовского вывода в системе итеративных преобразований / А.А. Гладких [и др.] // Автоматизация процессов управления. 2022. № 4 (70). С. 120–130. DOI: 10.35752/1991-2927\_2022\_4\_70\_120
11. Оценка критериев эффективности защиты данных от ошибок на базе перестановочного декодирования / А.В. Новоселов [и др.] // Автоматизация процессов управления. 2022. № 3 (69). С. 27–34. DOI: 10.35752/1991-2927\_2022\_3\_69\_27
12. Оценка статистических характеристик перестановочного декодера методом его программной реализации / А.Л.Х. Аттаби [и др.] // Автоматизация процессов управления. 2023. № 2 (72). С. 91–98. DOI: 10.35752/1991-2927\_2023\_2\_72\_91
- Дата поступления 26.11.2024  
Дата принятия 27.12.2024

**Брынза Александр Александрович**, аспирант кафедры радиотехники, телекоммуникаций и защиты информации Ульяновского государственного технического университета. 432027, Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32. Тел. + 7 937 888-72-66. E-mail: abrynza73@gmail.com

UDC 621.391

DOI: 10.18469/ikt.2024.22.4.05

## TRANSFORMATION OF COMBINATIONS FOR DIFFERENT CODE LENGTHS IN THE PERMUTATIONAL DECODING PROCESS

Brynza A.A.

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation

E-mail: abrynza73@gmail.com

This article presents a deep analysis and evaluation of the effectiveness of the transformation mechanisms for non-productive combinations in the permutational decoder. This research is crucial for optimization of the processes related to the transformation of elements from the complete list of non-productive permutations of numerators into elements from the complete list of productive permutations of numerators. Various approaches to implementation of the procedure for permuting forbidden numerators are considered, which allows to identify complexities and challenges arising during encoding for different code lengths. Special attention is given to the analysis of algorithmic aspects and time complexity, which not only allows to assess the effectiveness of the proposed methods but also helps to identify potential bottlenecks in existing solutions. The study also includes a comparison of various strategies and algorithms, contributing to a deeper understanding of the decoding process and the transformation of permutations.

**Keywords:** *permutational decoding, equivalent code, productive permutation, non-productive permutation, interval vector*

**Brynza Alexander Alexandrovich**, Ulyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation; PhD Student of Radio Engineering, Telecommunications and Information Security Department. Tel. + 7 937 888-72-66. E-mail: abrynza73@gmail.com

### References

- Gladkikh A.A. Permutation decoding as a tool to improve the energy efficiency of data exchange systems. *Electrosvyaz*, 2017, no. 8, pp. 52–56. (In Russ.)
- Gladkikh A.A., Ovinnikov A.A., Tamrazyan G.M. Mathematical model of a cognitive permutational decoder. *Cifrovaya obrabotka signalov*, 2019, no. 1, pp. 14–19. (In Russ.)
- Gladkikh A.A. et al. Coding methods and permutation decoding in the systems for network processing of data. *International Journal of Control and Automation*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 93–110.

4. Chilihhin N.Yu., Karpukhina E.K., Goryunov A.O. Development and integration of adaptive SCL decoder into hardware FPGA platform Xilinx Artix-7 XC7A100T. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2021, vol. 19, no. 3, pp. 357–365. DOI: 10.18469/ikt.2021.19.3.13 (In Russ.)
5. Peterson W., Weldon E. *Error-Correcting Codes*. Moscow: Mir, 1976, 594 p. (In Russ.)
6. Morelos-Zaragoza R. *The Art of Noise-Tolerant Coding. Methods, Algorithms, Applications*. Moscow: Technosphaera, 2005, 320 p. (In Russ.)
7. Sklyar B. *Digital Communication: Theoretical Foundations and Practical Applications*. Moscow: Williams, 2003, 1104 p. (In Russ.)
8. Gladkikh A.A., Namestnikov S.M., Pchelin N.A. Efficient permutation decoding of binary block redundant codes. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2017, no. 1 (47), pp. 67–74. (In Russ.)
9. Babanov N.Yu. et al. Properties of cyclic structures in the system of permutation decoding of redundant codes. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2020, no. 2 (60), pp. 101–108. DOI: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-101-108 (In Russ.)
10. Gladkikh A.A. et al. Efficiency evaluation of the data error protection based on bayesian inference in the system of iterative transformations. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2022, no. 4 (70), pp. 120–130. DOI: 10.35752/1991-2927\_2022\_4\_70\_120 (In Russ.)
11. Novoselov A.V. et al. Evaluation of criteria for the effectiveness of data protection against errors based on permutation decoding. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2022, no. 3 (69), pp. 27–34. DOI: 10.35752/1991-2927\_2022\_3\_69\_27 (In Russ.)
12. Attabi A.L.Kh. et al. Evaluation of statistical characteristics of a permutation decoder by its software implementation statistical. *Avtomatizaciya processov upravleniya*, 2023, no. 2 (72), pp. 91–98. DOI: 10.35752/1991-2927\_2023\_2\_72\_91 (In Russ.)

*Received 26.11.2024*

*Accepted 27.12.2024*