

УДК 621.391

## ПЕРЕСТАНОВОЧНОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ С СИСТЕМОЙ АДАПТИРОВАННЫХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РЕШЕНИЙ<sup>1</sup>

*Гладких А.А., д.т.н. профессор, профессор кафедры Радиотехника, телекоммуникации и защита информации Ульяновского государственного технического университета, e-mail: a\_gladkikh@mail.ru*

*Овинников А.А., к.т.н., доцент кафедры Телекоммуникаций и основ радиотехники Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: ovinnikov.a.a@for.rsreu.ru*

*Пчелин Н.А., к.т.н. главный конструктор Федерального научно-производственного центра акционерного общества «Научно-производственное объединение «Марс», г. Ульяновск, e-mail: rna3@yandex.ru*

*Брынза А.А., аспирант Ульяновского государственного технического университета, e-mail: abrynza73@gmail.com*

### PERMUTATION DECODING WITH A SYSTEM OF ADAPTED ALTERNATIVE SOLUTIONS

*Gladkikh A.A., Ovinnikov A.A., Pchelin N.A., Brynza A.A.*

*The expediency of using the permutation decoding (PD) method in practice is presented in a number of papers, where the procedure for searching for equivalent codes (EC) offers a unique opportunity to replace matrix calculations of various permutations of symbols, accepted code vectors, with a list of ready-made solutions calculated a priori and fixed in the cognitive maps of the decoder. The problem arises of organizing a rational search for the required data in the system of lists of cognitive decoder cards. The paper describes new properties of permutations of character numerators of binary code combinations, which may be of interest to specialists working in the field of abstract algebra and combinatorics. The concepts of the combined orbit (CO) of permutations are clarified and the term of the local orbit (LO) of permutations is introduced. It is shown that combining these properties with the features of constructing binary group codes makes it possible to organize more advanced algorithms for their processing in the PD system by introducing a list of alternative solutions into the decoder's cognitive map. The aim of the work is to develop and discuss the general principles of drawing up cognitive maps of block redundant codes of various lengths.*

**Key words:** permutation decoding, procedure for searching for equivalent codes, cognitive maps of the decoder, combined orbit, local orbit, decoder's cognitive map.

**Ключевые слова:** перестановочное декодирование, производительные перестановки, непроизводительные перестановки, образующие комбинации орбит, сборная орбита перестановок, локальная орбита перестановок, интервальная оценка нумераторов, когнитивная карта декодера.

#### Введение

Работа посвящена вопросам совершенствования методов цифровой обработки данных в системах перестановочного декодирования (ПД) коротких систематических избыточных кодов. Известно, что ПД способно обеспечить высокий показатель энергетического выигрыша кода (ЭВК), что важно для многих систем управления и измерения с дистанционной обработкой данных, обеспечивающих, как правило, главные показатели любой системы в формате понятий эмерджентности, гомеостаза и взаимодействия с внешней (окружающей) средой [1 – 4]. Основной особенностью перспективных интеллектуальных систем измерения и управления является их высоковероятное совмещение с телекоммуникационными средствами. Факторами, определяющими теоретическую суть такого совмещения и активно развиваемых его на практике, являются создание беспилотных транспортных средств, решение многочисленных задач управления робототехническими

*Целесообразность применения на практике метода перестановочного декодирования (ПД) представлена в ряде работ, где в процедуре поиска эквивалентных кодов (ЭК) предлагается уникальная возможность замены матричных вычислений различных перестановок символов, принятых кодовых векторов, списком готовых решений, вычисленных априори и зафиксированных в когнитивных картах декодера. Возникает задача организации рационального поиска требуемых данных в системе списков когнитивных карт декодера. В работе описываются новые свойства перестановок нумераторов символов кодовых комбинаций двоичных кодов, которые могут представлять интерес для специалистов, работающих в области абстрактной алгебры и комбинаторики. Уточняются понятия сборной орбиты (СО) перестановок и вводится термин локальной орбиты (ЛО) перестановок. Показано что, объединение этих свойств с особенностями построения двоичных групповых кодов позволяет организовать более совершенные алгоритмы их обработки в системе ПД за счет введения в когнитивную карту декодера списка альтернативных решений. Целью работы является разработка и обсуждение общих принципов составления когнитивных карт блоковых избыточных кодов различных длин.*

устройствами, дистанционное наблюдение и ассистирование, выполнение многочисленных навигационных миссий и очень актуальных задач, связанных с геопривязками объектов и защитой данных в бортовых системах. При этом заметно резкое повышение требований к временным показателям реализации целевой функции

управления с обеспечением заданных требований по информационной надежности, обрабатываемых в такой объединенной системе данных.

Жесткость требований к надежности работы и достоверности получаемой и обрабатываемой информации в элементах и устройствах измерительной техники и систем управления кратно возрастает для объектов реального времени. Именно в таких системах наиболее востребованы новые методы синтеза элементов технического зрения, систем связи и навигации, защиты цифровых данных от влияния мешающих факторов, гибких методов обработки оперативной информации и внедрения передовых технологий, связанных с реализацией когнитивных систем.

### Статистические оценки перестановок отдельных кодов

Для достижения поставленной цели в работе предлагается оригинальная программа, позволяющая осуществить поиск счетного множества перестановок символов, выявить эффект не пересечения перестановок, оценить это множество с точки зрения производительных перестановок нумераторов (ППН) и непроизводительных перестановок нумераторов (НПН), выявить тонкую структуру орбитальных свойств когнитивной карты декодера. Представление данных когнитивной карты (КК) в виде образующих комбинаций орбит (ОКО) позволяет уменьшить объем памяти такой карты ровно в  $k$  раз, если учитывать только СО. Как будет показано ниже, в состав любой СО входит ровно  $k$  ЛО, поэтому исходя из возможностей используемого в декодере процессора необходимо решить дилемму: удерживать в памяти КК только орбиты типа СО и в случае необходимости вычислять требуемые ЛО, или заносить в память КК все орбиты. В последнем случае объем памяти КК увеличивается в  $k$  раз. Примеры глобальных орбит для различных двоичных кодов приведены на рис. 1. При этом, для удобства начальные комбинации ЛО, начинающиеся на нумератор 1 (признак ЛО) в каждой СО, подняты заливкой.

Для кода БЧХ (15, 5, 7) приведены образцы двух СО. Для одной такой орбиты определитель перестановки не равный нулю дает производительную перестановку в отношении ЭК, в другом случае такой код получен быть не может (определитель перестановки равен нулю). Сравнение СО показывает, что у них много общего, но из-за показателей определителей они должны быть занесены в разные КК: соответственно в карты производительных и непроизводительных перестановок. Целесообразно показатель ОКО для СО определять, как наименьшую разницу между нумератором, стоящим на первой позиции и нумератором, стоящим на  $k$  позиции. Для кода (7, 4) из рис. 1 это будет 1 2 3 4, для СО кода (15, 5) соответственно 1 3 4 6 10 и 1 3 6 7 11, для кода (15, 7) – 1 2 3 4 6 10 11, что позволяет лексикографически разместить ОКО только для СО или совместно для СО и ЛО в системе когнитивных карт. Объективную оценку можно получить на основе данных, приведенных в табл. 1. Данные получены методом прямого перебора перестановок нумераторов с использованием специально разработанной программы, позволившей для каждой перестановки оценить вырожденность переставленной части порождающей матрицы кода размерности  $k \times k$ .

Из табл. 1 видно, что объем выборки СО для кода (15,7) уменьшился на 54 %, а для кода (15,5) на 66 %, что положительно сказывается на процедуре поиска ОКО в списке соответствующей КК. Подобная процедура положительно сказывается, в практическом отношении, например, в беспроводных сенсорных сетях, сенсорные узлы которых критичны к энергетическим затратам их элементов питания [5].

Наглядно отношения производительных и непроизводительных комбинаций для представленных кодов, показано на рис. 2. Становится очевидным, что в перспективе, возникает задача разработки рациональных алгоритмов, которые позволяют трансформировать непроизводительные комбинации в перестановки, пригодные для получения ЭК.

Код (7, 4, 3)			
1	2	3	4
2	3	4	5
3	4	5	6
4	5	6	7
1	5	6	7
1	2	6	7
1	2	3	7
Повтор цикла. det ≠ 0			

Код БЧХ (15, 5, 7)				
4	6	7	9	13
5	7	8	10	14
6	8	9	11	15
1	7	9	10	12
2	8	10	11	13
3	9	11	12	14
4	10	12	13	15
1	5	11	13	14
2	6	12	14	15
1	3	7	13	15
1	2	4	8	14
2	3	5	9	15
1	3	4	6	10
2	4	5	7	11
3	5	6	8	12
Повтор цикла. det ≠ 0				

Код БЧХ (15, 5, 7)				
1	3	6	7	11
2	4	7	8	12
3	5	8	9	13
4	6	9	10	14
5	7	10	11	15
1	6	8	11	12
2	7	9	12	13
3	8	10	13	14
4	9	11	14	15
1	5	10	12	15
1	2	6	11	13
2	3	7	12	14
3	4	8	13	15
1	4	5	9	14
2	5	6	10	15
Повтор цикла. det ≠ 0				

Код БЧХ (15, 7, 5)						
2	3	8	9	10	11	13
3	4	9	10	11	12	14
4	5	10	11	12	13	15
1	5	6	11	12	13	14
2	6	7	12	13	14	15
1	3	7	8	13	14	15
1	2	4	8	9	14	15
1	2	3	5	9	10	15
1	2	3	4	6	10	11
2	3	4	5	7	11	12
3	4	5	6	8	12	13
4	5	6	7	9	13	14
5	6	7	8	10	14	15
1	6	7	8	9	11	15
1	2	7	8	9	10	12
Повтор цикла. det ≠ 0						

Рис. 1. Структуры сборных орбит для некоторых двоичных кодов

Таблица 1. Объем выборки кодовых комбинаций для некоторых кодов

Код	Объем перестановок	Общее количество ОКО	Объем выборки ОКО СО без нулевых детерминантов	Машинное время составления КК
1	2	3	4	5
15,7,5	6435	3003	1512	150 с
15,5,7	3003	1001	616	70 с
23, 12, 7	1352078	705432	362880	900 с
18, 7, 7	31824	12376	6384	210 с

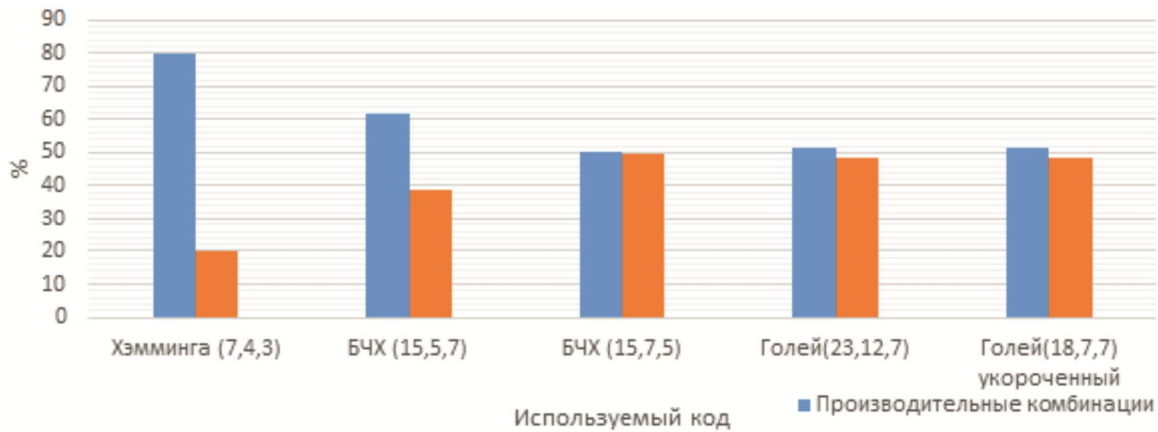


Рис. 2. Диаграмма отношения доли производительных и не производительных комбинаций

Важным свойством системы ПД является одинаковые значения проверочных матриц для любой комбинации входящих в конкретную орбиту. Это способствует сокращению объема данных, хранимых в декодере, для получения ЭК путем образования порождающих матриц для этих кодов за счет подключения к проверочной матрице соответствующей единичной матрицы слева. Проверочные части таких матриц должны храниться в специальной КК. Временные параметры перебора всех ОКО занимает мизерное время и не вызывает практических трудностей. Одновременно проведенный вычислительный эксперимент показал, что укороченные коды не дают никаких преимуществ перед основным кодом, из которого они получены. Поскольку соотношения производительных и непроизводительных перестановок не изменяют своих значений и по количественному составу находятся в относительном равновесии необходимо оценить свойства непроизводительных перестановок для построения рационального алгоритма декодирования.

#### Комбинаторика построения орбит производительных перестановок

В результате исследования впервые установлен ряд свойств орбит перестановок, которые описываются следующими ниже утверждениями и их доказательствами, при этом для демонстрации примеров и иллюстрации отдельных теоретических положений используется код БЧХ (15, 5). Декодер приемника принимает данные из канала связи и дает оценку каждому принятому символу кодовой комбинации, мягкую оценку (МО) в формате целочисленных значений. На основе этих решений формируется лексикографическая последовательность принятых символов в порядке убывания показателей МО. Итогом подобной работы всегда будут два кортежа увязанных данных, например,

где первая скобка объединяет в системе ПД номера  $k$  будущих информационных разрядов предполагаемого ЭК, а вторая скобка содержит показатели нумераторов  $(n - k)$  проверочных разрядов такого ЭК. В работах [6 – 11] было показано, что только ОКО СО единственным образом связывается с образцом проверочной матрицы ЭК, которая в свою очередь единственным образом преобразуется под уникальную последовательность номеров символов, ранжированных приемником по показателям МО. Задача заключается в наиболее простом варианте поиска образца проверочной матрицы орбиты по значению ОКО, но для этого необходимо найти по принятой произвольной последовательности соответствующее ей ОКО.

Докажем несколько утверждений, которые не рассматривались в рамках комбинаторики и абстрактной алгебры и которые позволяют сравнительно просто решить задачу рационального поиска ЭК.

**Утверждение 1. Произвольный кортеж информационных нумераторов систематического  $(n, k)$  кода при своем циклическом сдвиге порождает СО, в которой в явном виде проявляются ровно  $k$  ЛО.**

Любая СО содержит ровно  $k$  ЛО, начинающихся с нумератора равного 1. Действительно, последовательный циклический сдвиг  $k$  нумераторов в глобальной орбите должен  $k$  раз пройти отметку  $n$ -го нумератора. Как следствие нумератор 1 должен появиться также  $k$  раз. Будем считать, что ЛО формируются сдвигами кортежами, которые заканчиваются  $n$ -м нумератором, при этом некоторые орбиты могут содержать всего лишь одну комбинацию кортежа данных.

**Утверждение 2. Если ОКО СО указывает на невырожденность переставленной матрицы (или напротив), все комбинации орбиты обеспечивают получение ЭК (или напротив).**

Это следует из свойства линейной независимости

(или напротив) столбцов циклически переставленной матрицы. Как следствие из этого утверждения вытекает важное свойство не пересечения множеств производительных и непроизводительных перестановок.

**Утверждение 3. Разница между нумераторами комбинаций ОКО ЛО указывает на структуру проверочной части порождающей матрицы соответствующего ими ЭК.**

Для доказательства этого утверждения первоначально рассмотрим содержание табл. 2 на примере кода (15, 5) с возможностью создания ЭК. С одной стороны, содержание табл. 2 может быть полностью описано в карте ППН, с другой стороны, легко заметить цикличность следования интервалов в последовательности 2 1 2 4 6.

Именно это свойство позволяет минимизировать объем памяти когнитивной карты декодера за счет хранения проверочной части порождающей матрицы ЭК только базовой части для последовательности 2 1 2 4 (верхняя строка табл. 2). Все другие варианты построения подобной матрицы являются производными от этой матрицы, а ключом к преобразованию базовой матрицы ЭК в данном примере служит нумератор с индексом 6.

Таблица 2. Структура разниц нумераторов ОКО СО частных орбит кода (15, 5)

Комбинация ОКО	Разница соседних интервалов
1 3 4 6 10	2 1 2 4
1 7 9 10 12	6 2 1 2
1 5 11 13 14	4 6 2 1
1 3 7 13 15	2 4 6 2
1 2 4 8 14	1 2 4 6

Если этот нумератор содержится на первом месте, то в исходной проверочной матрице нижняя строка перемещается на верхнюю позицию и только. Если нумератор с индексом 6 находится на четвертом месте, то в цикле перемещения необходимо выполнить четыре шага. Рассмотрим это на примере кода (15, 5). Последовательность описанных преобразований показана в табл. 3.

В ходе оценки определителя конкретной перестановки с использованием пакета прикладных программ MATLAB следует учитывать, что знак + или – для определителя не играет значения, поскольку в двоичных полях учитываются только положительные величины. При этом четные значения определителя принимаются равными нулю, поскольку оценивались они в данном программном продукте в десятичной системе счисления. Известно, что в двоичной системе счисления операция сложения по  $\text{mod } 2$  четного числа одинаковых элементов приводит к нулевому результату суммирования.

Таблица 3. Систематическое преобразования проверочной части порождающей матрицы ЭК в зависимости от содержания ОКО ЛО

1 3 4 6 10	1 7 9 10 12	1 5 11 13 14	1 3 7 13 15	1 2 4 8 14
2 1 2 4	6 2 1 2	4 6 2 1	2 4 6 2	1 2 4 6
1010101101	0110010111	1011110110	1101001111	0101111100
0101111100	1010101101	0110010111	1011110110	1101001111
1101001111	0101111100	1010101101	0110010111	1011110110
1011110110	1101001111	0101111100	1010101101	0110010111
0110010111	1011110110	1101001111	0101111100	1010101101

Например, для кода БЧХ (15, 5) для перестановки 6 8 9 11 15, представленной на рис. 1, применительно к переставленной матрицы  $A$  получим

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \det(A) = 3 \Rightarrow A^{-1} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0,667 & 0,333 & 0,333 & 0,667 & 0,333 \\ 0,333 & 0,333 & 0,333 & 0,667 & 0,667 \\ 0,667 & 0,333 & 0,333 & 0,333 & 0,333 \\ 0,333 & 0,667 & 0,333 & 0,333 & 0,667 \\ 0,333 & 0,667 & 0,333 & 0,333 & 0,333 \end{pmatrix}$$

Очевидно, что  $2 : 3 = 0,666... \approx 0,667$  и  $1 : 3 = 0,333$ . Но 2 – это ноль по  $\text{mod } 2$  при сложении данных союзной матрицы, следовательно, обратная матрица для матрицы  $A$  принимает вид:

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow A \times A^{-1} = E.$$

Описанная схема обработки данных производительных перестановок позволяет сократить объемы памяти КК хранения ОКО СО и соответствующих им частей проверочных матриц для порождающих матриц ЭК в систематической форме в  $k$  раз. В этой связи возникает вопрос рациональной обработки непроизводительных перестановок.

### Особенности орбит непроизводительных перестановок

Главной отличительной чертой НПН является вырожденность переставленных матриц нумераторов наиболее надежных символов принятых кодовых векторов. И если для кода Хэмминга (7, 4) число таких перестановок составляет всего 20 % от их общего числа, то для кодов (15, 5) и (15, 7) общее число непроизводительных перестановок возрастает до 50 %.

Это ставит под сомнение эффективность ПД по параметру ЭВК, поскольку процедура поиска результативной перестановки неоправданно затягивается по времени. Требуется оригинальное техническое решение для снижения уровня отрицательного эффекта в системе

оптимальных по ЭВК кодов. В других отношениях поиск ОКО различного класса не отличается от алгоритмов выявления подобных орбит в системе производительных перестановок. Примеры решения указанных задач показаны на рис. 3.

Код БЧХ (15, 7, 5)						
1	3	6	8	9	11	12
2	4	7	9	10	12	13
3	5	8	10	11	13	14
4	6	9	11	12	14	15
1	5	7	10	12	13	15
1	2	6	8	11	13	14
2	3	7	9	12	14	15
1	3	4	8	10	13	15
1	2	4	5	9	11	14
2	3	5	6	10	12	15
1	3	4	6	7	11	13
2	4	5	7	8	12	14
3	5	6	8	9	13	15
1	4	6	7	9	10	14
2	5	7	8	10	11	
Повтор цикла. $\det \neq 0$						

Рис. 3. Структура ОКО для различных непроизводительных перестановок разных кодов

Переходя от перестановок к интервальным таблицам, можно заметить, что структура различий соседних значений нумераторов ничем не отличается от описанных выше применительно к множеству производительных перестановок и показана для одного из кодов в табл. 4. Это позволяет утверждать, что в реальном декодере в целях экономии времени анализа, принятого кодового вектора целесообразно направлять данные одновременно и на вход карты ППН, и на вход карты НПН. Очевидным является свойство, которое указывает на отсутствие пересечений указанных множеств. Поэтому отклик должен быть либо на выходе карты ППН, либо на выходе карты НПН. Идентичность процедуры поиска для множества ППН и НПН указывает на целесообразность распараллеливания вычислительного процесса поиска альтернативного признака принадлежности перестановки к одному или другому множеству. В предыдущих работах эта процедура носила последовательный характер. На первом этапе оценивалась принадлежность принятой приемником перестановки к числу произвольных и при отрицательном исходе (следовательно, перестановка непроизводительная) оценивалась возможность коррекции такой перестановки за счет замены младшего разряда из группы информационных символов на старший разряд из группы нумераторов проверочных разрядов.

Таблица 4. Структура разниц нумераторов ОКО частных орбит перестановки 1 4 6 8 9

Комбинация ОКО	Разница соседних интервалов
1 4 6 8 9	3 2 2 1
1 8 11 13 15	7 3 2 2
1 2 9 12 14	1 7 3 2
1 3 4 11 14	2 1 7 3
1 3 5 6 13	2 2 1 7

Описанный алгоритм удобен при использовании кода (7, 4), когда число производительных перестановок составляет 80 % от общего числа возможных перестановок. Для кодов БЧХ (15, 5) и (15, 7) эта пропорция изменяется в сторону увеличения числа непроизводительных перестановок и по этой причине становится невыгодной из-за соотношения ППН к НПН, как 50 % к 50 %. При этом вероятность удачной замены символов остается относительно низкой, поскольку новая перестановка после заметны символов может вновь оказаться из множества НПН.

По этой причине предлагается использовать более совершенный алгоритм когнитивного регулятора, когда в системе замены НПН появляются сведения о непродуктивных заменах. В этом случае табл. 3 преобразуется в табл. 4.

### Принцип работы когнитивного регулятора

Суть работы когнитивного регулятора в согласовании данных между когнитивными картами ППН и НПН заключается в более полном информационном обеспечении процедуры поиска ППН. Например, при использовании параллельной работы когнитивных карт регулятор обобщает результат такого поиска и принимает рациональное решение в процедуре поиска ЭК. Фрагмент не обработанной лексикографической карты НПН представлен в табл. 5. Не упорядоченная карта в данном случае представлена для выявления групповых закономерностей свойств частных ОКО в системе ОКО СО. Это не рационально с практической точки зрения. Для организации процедуры рационального поиска данных в карте НПН глобальные и частные ОКО должны быть классифицированы лексикографически, что вытекает из семантических моделей традиционных поисковых систем.

Становятся ясны закономерности абстрактной алгебры применительно к множеству НПН, рассматриваемого совместно за закономерностями построения проверочной матрицы избыточного кода. При этом запрещенные нумераторы однозначно не являются продуктивными при попытке перевода перестановки из множества НПН в систему ППН.

Выявлены предпосылки к закономерности, при которой ни один из символов из состава проверочной матрицы не приводит перевод перестановки обозначенной термином ВСЕ в систему ППН. Теоретического объяснения, обоснования этот факт на данном этапе исследований не найден. Однозначно потребуется специальная программа, которая позволит убедиться в закономерности этого явления или напротив в определенной исключительности.

Предварительно установлено, что такая замена обеспечивает положительный результат только при использовании двух битовой или трех битовой рекомбинации между информационными и проверочными разрядами. Для этого требуется дальнейшее изучение закономерностей интервальных зависимостей для оценки запрещенных нумераторов по шкале ОКО СО. Кроме того, заметно, что для отдельных замен запрещенными являются три нумератора и в одном случае таких запретов два.

Таблица 5. Структура нумераторов ОКО локальных орбит

Комбинация ОКО	Разница соседних интервалов	Запрещенные нумераторы
1 2 3 4 6	1 1 1 2	8 9 12
2 12 13 14 15	10 1 1 1	3 4 7
1 3 13 14 15	2 10 1 1	<b>ВСЕ</b>
1 2 4 14 15	1 2 10 1	6 7 10
1 2 3 5 15	1 1 2 10	7 8 11
1 2 3 4 9	1 1 1 5	6 8 12
1 8 9 10 11	7 1 1 1	4 13 15
1 6 13 14 15	5 7 1 1	3 5 9
1 2 7 14 15	1 5 7 1	4 6 10
1 2 3 8 15	1 1 5 7	<b>ВСЕ</b>
1 3 6 7 11	2 3 1 4	9 10
1 6 8 11 12	5 2 3 1	14 15
1 5 10 12 15	4 5 2 3	<b>ВСЕ</b>
1 2 6 11 13	1 4 5 2	4 5
1 4 5 9 14	3 1 4 5	7 8
1 4 6 8 9	3 2 2 1	2 3 12
1 8 11 13 15	7 3 2 2	4 9 10
1 2 9 12 14	1 7 3 2	<b>ВСЕ</b>
1 3 4 11 14	2 1 7 3	7 12 13
1 3 5 12 13	2 2 1 7	5 6 15

Анализ табл. 4 показывает, что запрещенное число значений нумераторов для разных ОКО из состава НПН различно, но все они имеют термин **ВСЕ**. Этот факт в теории кодирования вскрыт впервые и пока не нашел своего теоретического объяснения. Заметно, что запрещенные замены в системе НПН носят в зависимости от ОКО системный характер, который может быть использован для организации вычислительного процесса в случае критических значений по объему памяти когнитивных карт.

Вскрытые в ходе исследования закономерности перестановок в системе ПД позволяет упростить известные подходы к декодированию данных. В новых условиях декодер после выделения  $k$  надежных символов вычисляет интервальную разницу и формирует ОКО, которое одновременно направляет на входы когнитивной карты ПНП и НПН. Поскольку множества реализаций этих карт не пересекаются, то ответ может быть получен только на выходе одной из указанных карт. Если отвечает карта ПНП, то выявляется соответствующая проверочная матрица с учетом циклических сдвигов основной матрицы. В противном случае, корректируется последний столбец перестановки в группе информационных разрядов с учетом запрещенных нумераторов. Процесс продолжается в соответствии с классическим алгоритмом выявления вектора ошибок в системе ПД.

### Заключение

С точки зрения абстрактной алгебры в работе показаны ранее неизвестные свойства циклических перестановок замкнутого множества натуральных чисел, состоящего из  $n$  элементов, в котором при выделении произвольных  $k < n$  элементов однозначно образуются  $k$

независимых орбит, начинающихся на наименьшее из выбранных  $n$  элементов.

Синтез указанного свойства с закономерностями построения групповых двоичных систематических кодов показывает, что при формировании орбит все множество возможных перестановок нумераторов кодовых векторов разбивается на два непересекающихся множества. Каждое из этих множеств в отдельности отражает свойство вырожденности (или напротив) порождающих переставленных матриц, что означает невозможность (или возможность) формирования ЭК.

Показана возможность быстрой коррекции вырожденных матриц за счет заранее вычисленных альтернативных решений в перестановках. За счет свойства непересекающихся множеств орбит показана возможность распараллеливания процесса идентификации конкретной перестановки относительно принадлежности тому или другому множеству. Процесс поиска решения для двух множеств может решаться одновременно.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-10100.*

### Литература

1. Гладких А.А., Овинников А.А., Тамразян Г.М. Математическая модель когнитивного перестановочного декодера / Цифровая обработка сигналов. 2019. № 1. С. 14-19.
2. Питерсон У., Уэлден Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: «Мир», 1976. 594 с.
3. Гладких А.А., Климов Р.В., Чилихин Н.Ю. Методы Эффективного декодирования избыточных кодов и их современные приложения. Ульяновск: УлГТУ, 2016. 258 с.
4. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. Пер. с англ. ред. Афанасьева В.Б. М.: Техносфера. 2005. 320 с.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс. 2003. 1104 с.
6. Гладких А.А., Наместников С.М., Пчелин Н.А. Эффективное перестановочное декодирование двоичных блоковых избыточных кодов / Автоматизация процессов управления. 1 (47), 2017, С. 67-74.
7. Свойства циклических структур в системе перестановочного декодирования избыточных кодов / Бабанов Н.Ю., Гладких А.А., Наместников С.М., Шахтанов С.В. Автоматизация процессов управления. 2020. № 2 (60). С. 82-89.
8. Гладких А.А., Наместников С.М., Новоселов А.В., Толикина М.Ю., Аль-Месри А.С.А. Оценка эффективности защиты данных от ошибок на базе байесовского вывода в системе итеративных преобразований. Автоматизация процессов управления. 2022. № 4 (70). С. 120-130.
9. Новоселов А.В., Шахтанов С.В., Аль-Месри А.С.А., Толикина М.Ю. Оценка критериев эффективности защиты данных от ошибок на базе перестановочного декодирования. Автоматизация процессов управления. 2022. № 3 (69). С. 27-34.
10. Gladkikh A.A., Ganin D.V., Pchelin N.A., Shakhchanov S.V., Ocherovsky A.V. 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. 93-100.
11. Оценка статистических характеристик перестановочного декодера методом его программной реализации / А.Л.Х. Аттаби, А.А. Брынза, Д.В. Ганин, А.А. Ничунаев, А.В. Новоселов. Автоматизация процессов управления. 2023. № 2 (72). С. 91-98.