

УДК 004

## ПАКЕТ ПОЛУФОРМАЛИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.Н. Малышева, С.Л. Гольдштейн

Статья посвящена созданию концептуальной, структурной и модификации алгоритмической моделей системы имитационного моделирования. Цель моделирования – консалтинговая поддержка при разрешении проблемных ситуаций в деятельности организации.

**Ключевые слова:** система имитационного моделирования, концептуальная, структурная и алгоритмическая модели.

### Введение

Моделирование современных бизнес-процессов – это мощный инструмент, позволяющий анализировать не только то, как работает организация в целом, но и как организована деятельность на каждом отдельно взятом рабочем месте [1]. С одной стороны, моделирование может быть реализовано как метод, позволяющий дать оценку текущей деятельности организации. С другой стороны, оно может быть представлено как средство, позволяющее предвидеть различные ситуации, на основе анализа которых возможна минимизация рисков, возникающих на различных этапах деятельности организации. Последние годы для этого эффективно используют системы имитационного моделирования (ИМ) [2]. Они позволяют определить оптимальность изменений за считанные минуты, необходимые для проведения экспериментов с разными параметрами, отвечая на вопросы типа «что, если...»; решать задачи из любых областей – производства, логистики, финансов, здравоохранения. При этом новая политика, управляющие процедуры, правила принятия решений, организационная структура, потоки информации и т.д. могут быть исследованы без вмешательства в работу реальной системы; новые технические средства, планы размещения, программное обеспечение, транспортные системы и т.п. могут быть опробованы до того, как деньги, время и другие ресурсы будут потрачены на их приобретение и (или) создание [3]. Однако, системы ИМ имеют такие недостатки, как отсутствие управления процессом моделирования, использования развитой трехмерной анимации, возможности фиксации и оценки отдельных временных параметров системы. В результате модели одной и той же реальной системы, построенные разными аналитиками, могут иметь отличия. Системы ИМ не совершенны: они нуждаются в доработке [4].

В данной статье поставлена задача создания пакета полуформализованных моделей системы ИМ с целью устранения этих недостатков. Известно, что моделирование может быть осуществлено по состояниям «как есть» и «как должно быть». В данной статье моделируется состояние «как должно быть» (ТО-ВЕ).

### Концептуальная модель системы ИМ

На основе принципов системотехники [5], создана общая концептуальная модель (ОКМ) системы ИМ. Прототипной формой служил материал [6–8].

Система ИМ – это сложный комплекс, выполняющий группы функций – формулирование проблемы, определение границ системы, формулирование модели, подготовка данных, трансляция модели, оценка адекватности, стратегическое и тактическое планирование, экспериментирование, интерпретация, реализация, документирование, графика, управление и оценка ситуации, реализуемые путем современных технологий ИМ (AnyLogic, Arena, eM-Plant, GPSS и др.), на основе структуры из подсистем: формулирования проблемы, определения границ системы, формулирования модели, подготовки данных, трансляции модели, оценки адекватности, стратегического и тактического планирования, экспериментирования, интерпретации, реализации, документирования, графики, управления и оценки ситуации, направленные на удовлетворение интересов всех субъектов деятельности с группами глобальных и локальных целей.

### Структурная и алгоритмическая модели системы имитационного моделирования

На основе принципов системотехники [5] создана структурная и модифицирована алгоритмическая модель предлагаемого решения по системе ИМ (рис. 1, 2). Прототипной формой служил материал [6, 7, 9, 14]. В качестве прототипа блока «3D анимация» взят редактор трехмерной графики 3D Studio Max [10], «Управление работой системы ИМ» – средства управления программным обеспечением Microsoft [11]. Поскольку любая организация является динамической системой, т.е. ее поведение можно описать системой дифференциальных уравнений и, исследуя ее, получить сведения о происходящем явлении и возможность его мониторировать, то в качестве прототипа математического описания динамической системы (блок «Математика») и ее мониторирования (блок «Мониторирование») взяты материалы Э.

Камке [12], а средства визуализации (блок «Визуализация») – Mathcad [13]. При этом подсистема «Оценка ситуации» связана с остальными составляющими системы ИМ путем использования объектно-ориентированного языка.

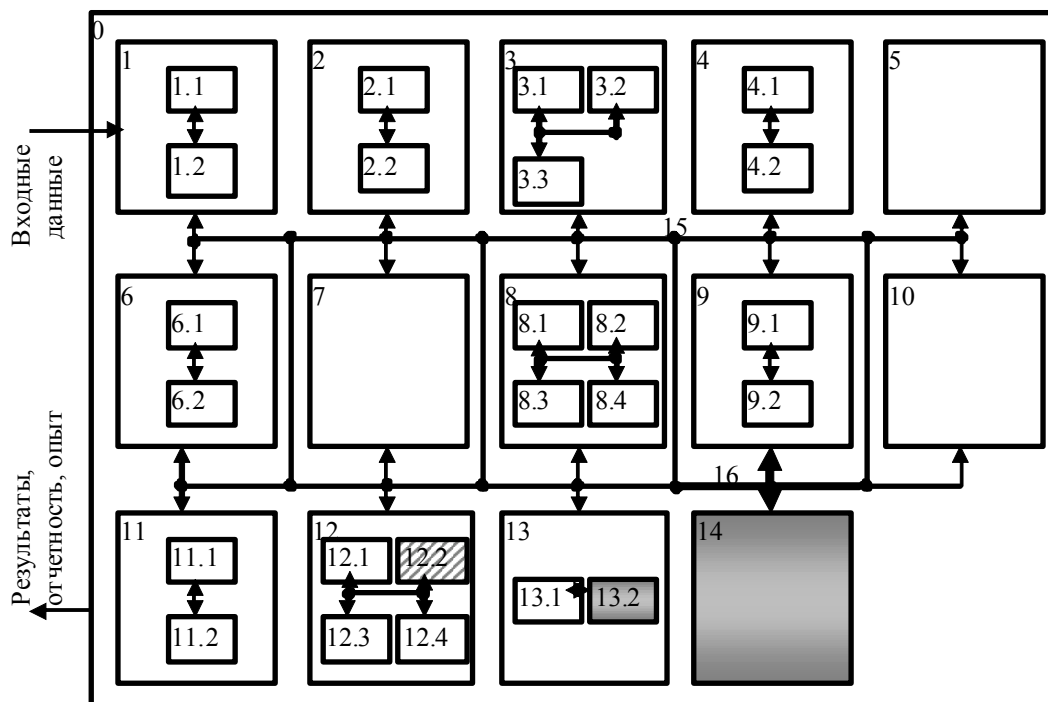


Рис. 1. Структурная модель предлагаемого решения системы ИМ (ТО-ВЕ):

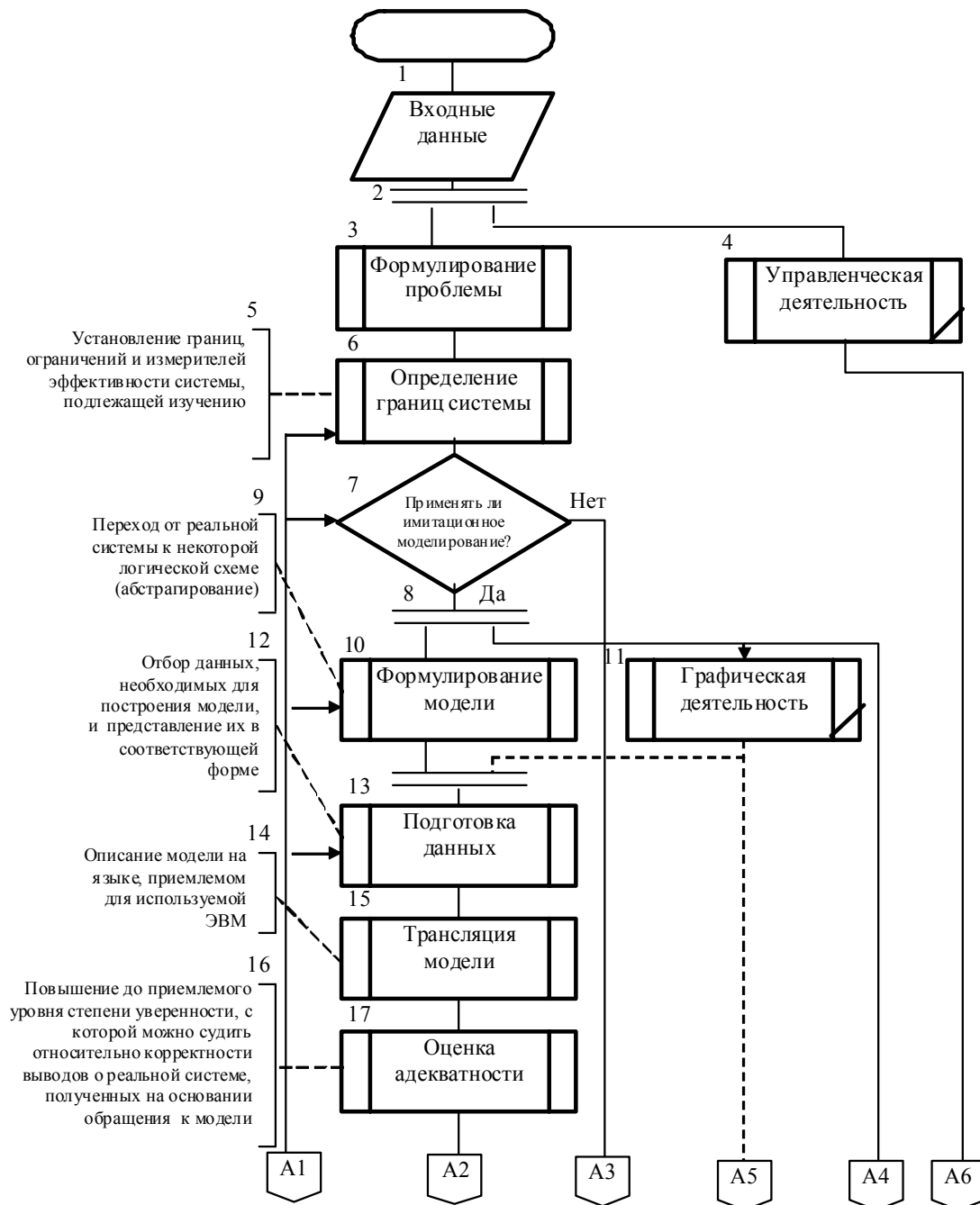
0 – система ИМ, подсистемы: 1 – формулирования проблемы, 2 – определения границ системы, 3 – формулирования модели, 4 – подготовки данных, 5 – трансляции модели, 6 – оценки адекватности, 7 – стратегического и тактического планирования, 8 – экспериментирования, 9 – интерпретации, 10 – реализации, 11 – документирования, 12 – графики, 13 – управления, 14 – оценки ситуации, 15 – интерфейс, 16 – новый интерфейс; блоки программных модулей системы: 1.1 – коллекции классов активных объектов, таймеров, сообщений, модулей Java, 1.2 – «Новый проект»; 2.1 – «Ограничения», 2.2 – «Оптимизатор»; 3.1 – «Переменная», 3.2 – «Зависимости переменных», 3.3 – «Диаграммы для формулирования модели»; 4.1 – «Библиотеки», 4.2 – «Уравнения, матрицы и массивы»; 6.1 – «Построить», 6.2 – «Вывод»; 8.1 – «Новый эксперимент», 8.2 – «Эксперимент», 8.3 – «Дополнительные свойства эксперимента», 8.4 – «Установки оптимизации»; 9.1 – «Новый набор данных», 9.2 – «Диаграммы и анимация для интерпретации»; 11.1 – «Документирование», 11.2 – «Интеграция»; 12.1 – «Анимация», 12.2 – «3D анимация», 12.3 – «Запуск анимации и 3D анимации», 12.4 – «Настройки анимации»; 13.1 – «Управление выполнением модели», 13.2 – «Управление работой системы ИМ»; новизна старшего и второго рангов обозначена серым фоном, улучшение второго ранга обозначено штриховкой

### Заключение

Таким образом, созданы общая концептуальная и структурная модели, а также модифицирована алгоритмическая модель системы имитационного моделирования. В них устранены недостатки, связанные с отсутствием управления процессом моделирования, использования развитой трехмерной анимации, возможности фиксации и оценки отдельных временных параметров системы, путем добавления подсистемы оценки ситуации и блока управления работой системы имитационного моделирования, а также улучшения блока трехмерной анимации. Полученные модели призваны быть маршрутизатором для дальнейшего структурного, функционально-структурного, критериального и т.п. моделирования, учитывающего специфику конкретной сферы.

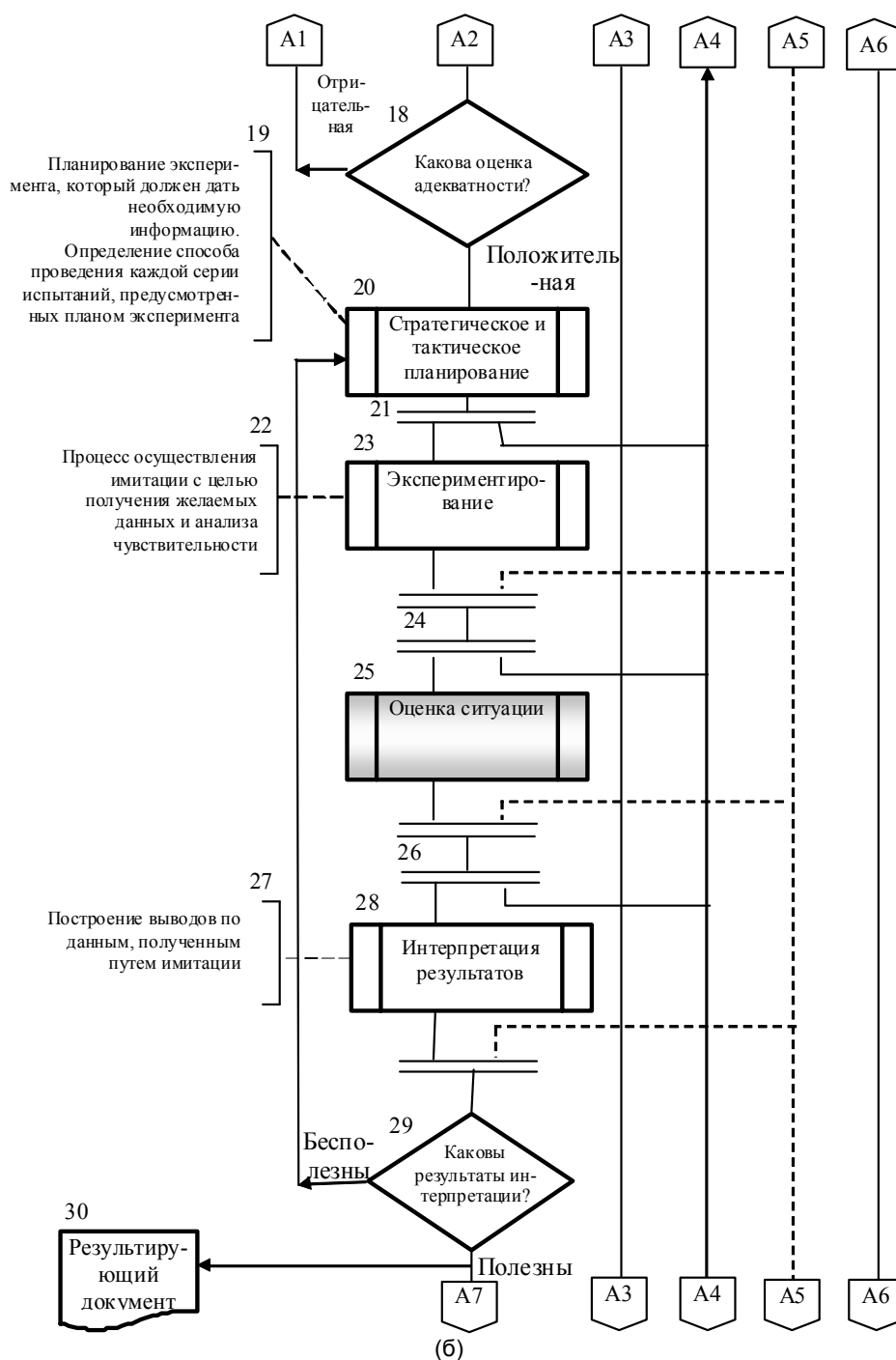
### Литература

1. Ильин В. В. Моделирование бизнес-процессов. Практический опыт разработчиков. – М.: Вильямс, 2006. – 176 с.
2. Румянцев М.И. Средства имитационного моделирования бизнес-процессов // Корпоративные системы: сетевой журн. – 2007. – № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.management.com.ua/ims/ims135.html> (дата обращения: 04.07.2009).



(а)

3. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Имитационное моделирование сложных динамических систем // EXPonenta.ru. Образовательный математический сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds\\_sim.asp](http://www.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds_sim.asp) (дата обращения: 03.06.2009).
4. Кобелев Н.Б. Имитационное моделирование. Что к нему относить и как понимать? (по следам конференции ИММОД-2005) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http://www.gpss.ru/statykobeleva\\_w.html](http://www.gpss.ru/statykobeleva_w.html) (дата обращения: 01.07.2009).
5. Гольдштейн С.Л., Ткаченко Т.Я. Введение в системологию и системотехнику. – Екатеринбург: ИРРО, 1994. – 198 с.
6. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Перевод с англ. под ред. Е.К. Масловского. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
7. Карпов Ю.Г., Борщев А.В. ANYLOGIC – Инструмент имитационного моделирования нового поколения // Телематика 2004: Материалы XI Всероссийской научно-методической конференции (7–10 июня 2004 г., Санкт-Петербург). – СПб, 2004. – С. 58–64.
8. Гольдштейн С.Л., Московских В.А. Пакет концептуальных моделей деятельности на рынке гражданского строительства // Интеллектика, логистика, системология. Вып. 17 / Под ред. В.В. Ерофеева. Челябинск, 2006. – С. 57–82.



9. Ткаченко Т.Я. Инструментальная среда системотехнического обслуживания сложных объектов. – Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. – 203 с.
10. Бонни Ш. Внутренний мир 3ds Max 9. Autodesk 3D Studio max 9. – 2007. – 1072 с.
11. Елманова Н. Средства управления программным обеспечением Microsoft: планы и перспективы // КомпьютерПресс. – 2004. – № 6. – С. 15–24.
12. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Перевод с нем. С.В. Фомина: Изд. 2, пер. и доп. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 654 с.
13. Дьяконов В. Mathcad 11/12/13 в математике: справочник (с CD-ROM). – М.: Горячая Линия–Телеком, 2007. – 958 с.
14. Гольдштейн С.Л., Кулигин В.А. Пакет алгоритмических моделей жизненного цикла топ-менеджмента комплексного промышленного строительства // Интеллектика, логистика, системология. Вып. 17 / Под ред. В.В. Ерофеева. – Челябинск, 2006. – С. 57–82.

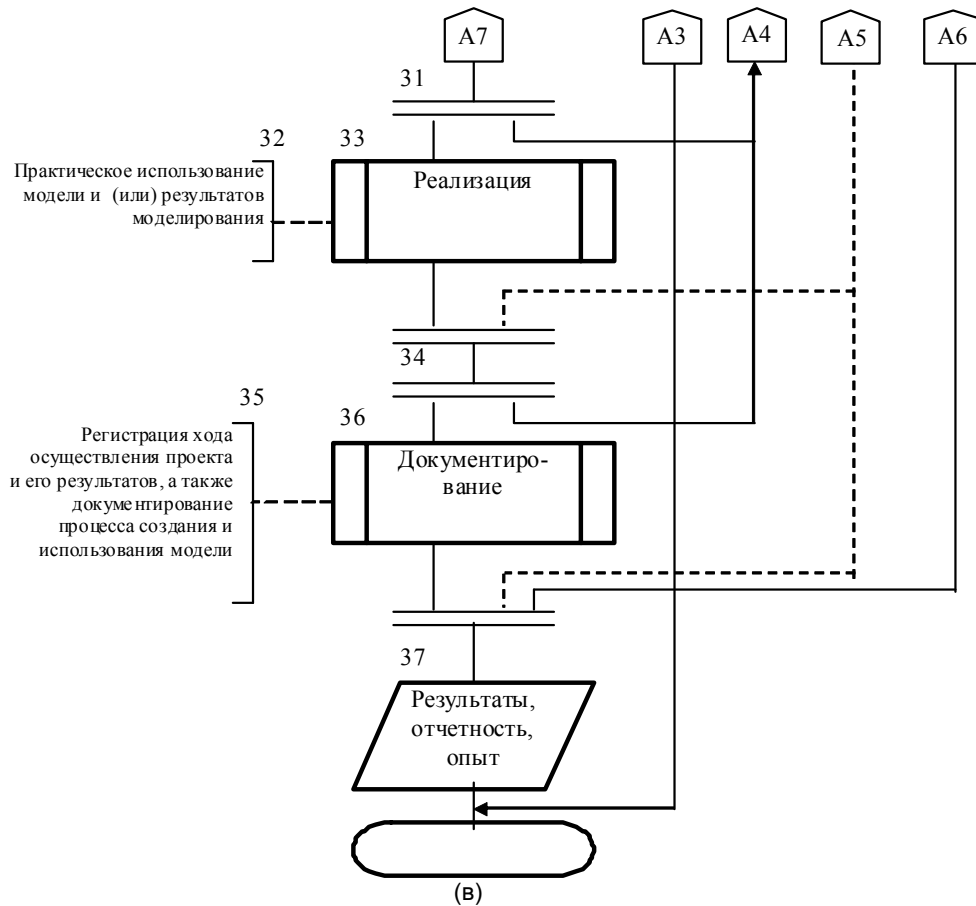


Рис. 2, а-в. Алгоритмическая модель предлагаемого решения системы ИМ (ТО-ВЕ): новизна старшего ранга (блок оценки ситуации) обозначена серым фоном, новизна второго ранга (подблок управленческой деятельности) и улучшение второго ранга (подблок графической деятельности) обозначены уголком

- Мальшова Екатерина Николаевна** – ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», аспирант, katyona@bk.ru
- Гольдштейн Сергей Львович** – ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, vtssl@dpt.ustu.ru

разрядных кодовых комбинаций и обеспечивают разрешающую способность преобразователя угловых перемещений на основе ПСКШ  $\delta = 360^\circ / M$ .

Как следует из метода построения ПСКШ, ее разрешающая способность определяется длиной М-последовательности  $M = 2^n - 1$ . Очевидно, что при любой разрядности шкалы теряется одна (нулевая) кодовая комбинация. Однако при построении некоторых технических систем с использованием преобразователей угловых перемещений необходимо обеспечить разрешающую способность последних, кратную  $2^n$ . Ниже предлагается метод построения КШ на основе нелинейных двоичных последовательностей, обеспечивающий разрешающую способность шкалы  $\delta = 360^\circ / 2^n$ .

### Теоретические основы метода

Нелинейная последовательность – это последовательность двоичных символов  $\{a_j\}$  длины  $B=2^n$ , удовлетворяющих рекурсивному соотношению [5]

$$a_{n+j} = \bigoplus_{i=0}^{n-1} a_{i+j} h_i \oplus \prod_{i=1}^{n-1} \bar{a}_{i+j}, \quad j = 0, 1, \dots, B - n - 1, \quad (1)$$

где знак  $\oplus$  означает суммирование по модулю два, а индексы при символах последовательности берутся по модулю  $B$ . Начальные значения символов  $a_0 a_1 \dots a_{n-1}$  последовательности выбираются произвольно.

В (1)  $h_i$  – коэффициенты, зависящие от вида примитивного полинома степени  $n$  с коэффициентами поля Галуа  $GF(2)$  [6], т. е.

$$h(x) = \sum_{i=0}^{n-1} h_i x^i, \quad (2)$$

где  $h_0 = h_{n-1} = 1$ , а  $h_i = 0, 1$  при  $0 < i < n$ ,

$$\prod_{i=1}^{n-1} \bar{a}_{i+j} = \begin{cases} 1, & \text{если все } \bar{a}_{i+j} = 1, \\ 0 & \text{– в других случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

Первое слагаемое в (1) определяет правило образования линейной по отношению к оператору суммирования по модулю 2 М-последовательности, а второе слагаемое указывает на операцию умножения значений  $n-1$  кодовых символов. Это приводит к тому, что полученная последовательность символов становится нелинейной и в ней появляется комбинация, содержащая  $n$  последовательных нулей. Таким образом, нелинейная последовательность может быть получена из М-последовательности, если к ней в месте расположения  $n-1$  нулей добавить 0.

### Метод построения кодовых шкал на основе нелинейных двоичных последовательностей

Сформулируем метод построения  $n$ -разрядной одноканальной КШ на основе нелинейной последовательности. В дальнейшем изложении будем называть такие шкалы нелинейными кодовыми шкалами (НКШ).

1. В зависимости от требуемой разрядности шкалы  $n$  выбирается полином  $h(x)$  степени  $n$  [6].
2. Используя рекурсивное соотношение (1), генерируется последовательность  $\{a_j\}$ .
3. Элементарные участки (кванты) шкалы  $\delta$  выполняются в соответствии с символами нелинейной последовательности  $\{a_j\}$ , где символам 1 последовательности соответствуют активные, а символам 0 – пассивные участки информационной дорожки. Для определенности символы последовательности отображаются на информационной дорожке по направлению движения часовой стрелки в порядке  $a_0 a_1 \dots a_{B-1}$ .
4. Осуществляется размещение на шкале  $n$  считывающих элементов с шагом, равным одному кванту, т.е. в соответствии с полиномом размещения

$$r(x) = \sum_{m=0}^{n-1} x^m. \quad (4)$$

Единственность такого размещения объясняется нелинейными свойствами рассматриваемой последовательности.

Покажем, что круговые одноканальные НКШ позволяют строить на своей основе преобразователи перемещения, использующие метод параллельного считывания. Для этого сформулируем следующие утверждения.

*Утверждение 1.* НКШ позволяют получить ровно  $B$  различных  $n$ -разрядных кодовых комбинаций, соответствующих последовательности из  $B$  квантов перемещения.

*Доказательство.* Рассмотрим фрагмент нелинейной последовательности из  $n$  последовательных символов. Он соответствует некоторой кодовой комбинации  $a_j a_{j+1} \dots a_{j+n-1}$ , воспроизводимой с информационной дорожки НКШ считывающим узлом из  $n$  элементов. Считывающие элементы на НКШ расположены

с шагом в один квант, положение кодированного элемента – произвольное. После перемещения шкалы на  $k$  квантов ( $k < B$ ) с информационной дорожки шкалы считывающим узлом будет воспроизводиться  $n$ -разрядная кодовая комбинация  $a_{j+k}a_{j+k+1} \dots a_{j+k+n-1}$ . Условие равенства этих кодовых комбинаций, т.е.

$$a_j a_{j+1} \dots a_{j+n-1} = a_{j+k} a_{j+k+1} \dots a_{j+k+n-1} \tag{5}$$

означает, что период нелинейной последовательности равняется  $k$ . Это противоречит свойству нелинейной последовательности (полученной, в свою очередь, из М-последовательности), по которому ее период  $B = 2^n$  [5]. Следовательно, эти кодовые комбинации должны быть различны. Так как число символов нелинейной последовательности равно  $B$ , то каждому перемещению НКШ на один квант соответствует своя  $n$ -разрядная кодовая комбинация, и их будет равно  $B$ , что и требовалось доказать.

*Утверждение 2.* Разрешающая способность однопорочечной НКШ определяется соотношением

$$\delta = \frac{360^\circ}{B} \tag{6}$$

*Доказательство.* Доказательство очевидно, так как НКШ имеют кодовую дорожку с числом квантов  $B = 2^n$  и позволяют получить при полном обороте шкалы  $B$  различных  $n$ -разрядных кодовых комбинаций.

### Пример построения кодовой шкалы

Продемонстрируем метод построения круговой однопорочечной НКШ примером (см. рисунок), для простоты ограничившись четырьмя разрядами преобразования.

Информационная дорожка шкалы выполнена в соответствии с символами нелинейной последовательности  $\{a_j\} = a_0 a_1 \dots a_{15} = 0000100110101111$  длины  $B = 2^n = 2^4 = 16$ , для построения которой использован примитивный полином  $h(x) = x^4 + x + 1$ , а символы  $a_{4+j}$  последовательности  $a$  при начальных значениях  $a_0 = a_1 = a_2 = a_3 = 0$  удовлетворяют рекурсивному соотношению  $a_{4+j} = a_{1+j} \oplus a_j \oplus a_{1+j} a_{2+j} a_{3+j}$ ,  $j = 0, 1, \dots, 11$ . В примере размещение четырех СЭ вдоль кодовой дорожки определяется полиномом  $r(x) = 1 + x + x^2 + x^3$ .

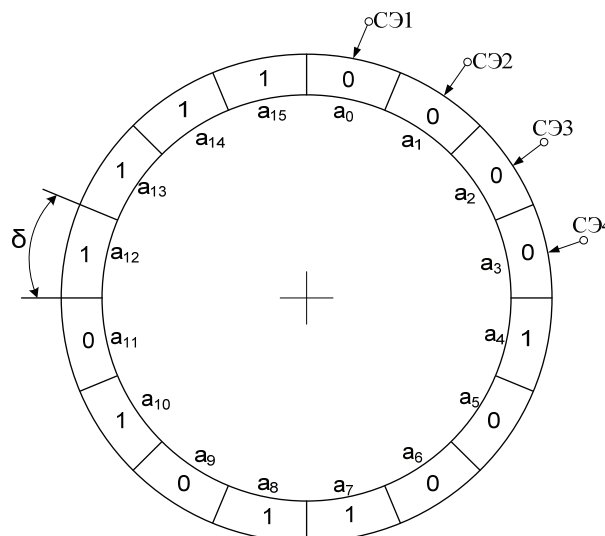


Рисунок. Четырехразрядная НКШ с размещением СЭ в соответствии с полиномом  $r(x) = 1 + x + x^2 + x^3$

Фиксируя считывающими элементами СЭ<sub>1</sub>, СЭ<sub>2</sub>, СЭ<sub>3</sub> и СЭ<sub>4</sub> последовательно кодовую комбинацию при перемещении шкалы циклически на один элементарный участок, например, против направления движения часовой стрелки, получаем шестнадцать различных четырехразрядных кодовых комбинаций: 0000, 0001, 0010, 0100, 1001, 0011, 0110, 1101, 1010, 0101, 1011, 0111, 1111, 1110, 1100, 1000.

### Заключение

Рассмотренный в данной работе метод построения кодовых шкал на основе нелинейных двоичных последовательностей может быть положен в основу построения преобразователей угловых перемещений, работающих по методу считывания. При этом предлагаемые НКШ имеют всего одну информационную кодовую дорожку и разрешающую способность, равную классическим КШ, маска которых выполнена в обыкновенном двоичном коде или в коде Грея. Следует также отметить, что предложенный метод полностью инвариантен к разрядности преобразователя.