

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МЯГКОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Фрейман В. И. – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Решены задачи повышения достоверности передачи информации в каналах и трактах систем управления на фоне воздействия совокупности помех различной природы и вида. Объектом исследования является приемное устройство (декодер канальных символов), предмет исследования – модели, методы и алгоритмы обработки и принятия решения на уровне элементарных сигналов (канальных символов). Цель работы – создание и исследование методов и алгоритмов «мягкого» декодирования элементарных сигналов для обеспечения достоверности передачи информации по встроенным и выделенным каналам и трактам систем управления.

Метод. Использован математический аппарат нечетких множеств для описания ошибок, возникающих в каналах и трактах передачи информации между элементами систем управления. Реализованы методы и алгоритмы «мягкого» декодирования (дающих большую информацию для принятия решения, чем «жесткая» схема принятия решения) в первой решающей схеме приемных устройств в составе аппаратно-программных элементов систем управления. Выполнено программное моделирование предложенного способа принятия решения, основанного на методах нечеткой логики.

Результаты. Разработаны структурная схема и алгоритм работы квазиоптимального приемника элементарных сигналов, оригинальность которого заключается в применении методов нечеткой логики для принятия решения. Создан и исследован алгоритм принятия решения в среде MathWorks Fuzzy Logic Toolbox.

Выводы. Проведенные в работе исследования позволяют сделать следующие выводы о том, что предложенная мягкая схема декодирования: обеспечивает большую «гибкость» при принятии решения, что положительным образом сказывается на достоверности передачи информации; не требует введения и использования многозначной логики (например, символ « α » для модели канала 2×3 , символы «1b» и «0b» для модели канала 2×4 , символы «0»...«7» для модели канала 2×8), что облегчает реализацию алгоритма декодирования; позволяет проводить арифметические, а не логические, вычисления, что снижает вычислительную сложность алгоритма принятия решения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: канальный символ, декодирование, принятие решения, нечеткая логика, моделирование, квазиоптимальный прием.

АББРЕВИАТУРЫ

БДФЗ – блок дефаззификации;
БПП – блок задания базы знаний (продукционных правил);
БФЗ – блок фаззификации;
БФП – блок задания функций принадлежности для входных и выходных ЛП;
Г – генератор тактовых импульсов;
к.и. – конец импульса;
КС – канал связи;
ЛП – лингвистическая переменная;
МНЛВ – машина нечеткого логического вывода;
н.и. – начало импульса;
ПРС – первая решающая схема;
ПЭ – пороговые элементы;
РИУС – распределенная информационно-управляющая система;
СХ – устройство синхронизации;
УОП – узел определения параметров импульса дробления;
УПО – узел предварительной обработки;
УПР – узел принятия решения;
Ф – формироваватель;
ФП – функция принадлежности.

НОМЕНКЛАТУРА

f – флаг;

H – средняя высота импульсов дробления;
 L – средняя длительность импульсов дробления;
 N – среднее количество импульсов дробления;
 n – длина сообщения;
 P – вероятность;
 $\{r\}$ – база продукционных правил;
 u – элементарный сигнал на выходе канала связи (в форме импульса);
 \dot{y} – входной сигнал, ограниченный (форматированный) по длительности и амплитуде;
 U – амплитуда элементарного сигнала;
 x – символ стирания;
 \bar{X} – входной четкий вектор ($\{N; L; H\}$ – значения входных лингвистических переменных);
 \bar{X} – вектор нечетких множеств, соответствующий входному вектору \bar{X} ;
 \bar{Y} – результат логического вывода в виде вектора нечетких множеств;
 \bar{Y} – выходной четкий вектор (значение двоичного символа);
 $\{\mu\}$ – функции принадлежности (input – входных ЛП, output – выходных ЛП);
 ρ – отношение «сигнал/помеха»;
 τ – длительность элементарного сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач управления и контроля качества передачи информации между элементами и устройствами распределенных информационно-управляющих систем (РИУС) активно применяются методы и средства сетевой диагностики [1]. Они реализуют такие этапы диагностирования, как подготовка тестов, их дистанционная загрузка в объект диагностирования, активизация режима тестирования и реализация тестов, дистанционная выгрузка результатов диагностирования и их анализ [2]. Следовательно, на достоверность принятия решения о техническом состоянии элементов и устройств РИУС по результатам диагностирования существенно влияет достоверность передачи диагностической информации по каналам и трактам РИУС. Поэтому проблема обеспечения достоверности передачи тестовых сигналов по встроенным и выделенным каналам и трактам РИУС при дистанционном формате процедуры технического диагностирования является актуальной. Это также подтверждается недостаточно подробным освещением указанной проблемы в известных научных и прикладных публикациях, что подчеркивает важность проведения исследований в направлении помехоустойчивой передачи информации по встроенным и выделенным каналам и трактам РИУС.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Прием информации в системах передачи осуществляется, как правило, в два этапа: прием элементарных сигналов и прием сообщения в целом [3]. Прием элементарных сигналов (символов алфавита канала связи – КС) реализуется в первой решающей схеме (ПРС). Она выполняет функции приемника (демодулятора, линейного узла, декодера линейного кода, канального фильтра и т.п.). Прием на уровне сообщения в целом реализуется во второй решающей схеме (декодере канала), в которой выполняется алгоритм коррекции ошибок (при использовании избыточного кодирования сообщений [10]). Первый этап приема обеспечивает заданное значение вероятности ошибки при принятии решения о переданном канальном символе, второй – о сообщении в целом.

Достоверность передачи информации в распределенных системах управления во многом определяется уровнем искажений, вносимых помехами в элементарные сигналы (канальные символы) при передаче по каналу связи. При большом уровне помех (малом значении отношения «сигнал/шум») для обнаружения и/или исправления ошибок (неправильная интерпретация принятых символов) наиболее часто используют аппарат и методы канального уровня модели взаимодействия открытых систем. Они реализуются во второй решающей схеме (ВРС) – канальном декодере, в частности, методы помехоустойчивого кодирования, многократного повторения (символов или сообщений), обратная связь и т.д. Это вносит существенную избыточность, приводит к задержкам, что в результате снижает информационную скорость и пропускную способность канала передачи данных [4].

Считается, что в большинстве каналов и трактов передачи действует аддитивная внешняя помеха, описываемая моделью «белый шум». Такая помеха приводит к небольшим искажениям формы передаваемого сигнала, что позволяет применять в ПРС хорошо проработанные способы оптимального приема (например, по критерию В.А. Котельникова). Однако, как правило, в реальных каналах связи действует некоторая совокупность помех, которая точно не описывается известными моделями. В этих случаях целесообразно анализировать не помехи, а вызываемые ими искажения сигналов [4].

В статье решаются следующие частные задачи:

1. Разработка и исследование математической модели ошибок и искажений, возникающих в канале передачи информации при воздействии комплексной помехи.
2. Создание методов и алгоритмов «мягкого» декодирования на уровне элементарного сигнала, для повышения достоверности которых используется нечеткая логика.
3. Разработка структурной схемы квазиоптимального приема и описание алгоритма ее функционирования, а также создание и исследование ее модели в среде моделирования.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для обеспечения заданных высоких требований по достоверности важно построить адекватную модель ошибок в канале связи. Часто применяемые математические модели помех [5, 6] не всегда адекватно описывают комплексный характер их воздействия на сигнал, что приводит к необходимости анализировать вносимые ими искажения [3]. Также необходимо оценить последствия от воздействия помех на передаваемые канальные символы (элементарные сигналы). Важно выяснить, как способы учета неопределенности в принятии решения на уровне элементарного сигнала или всего сообщения в целом отразятся на показателях достоверности передачи информации.

Для учета искажений разработаны способы приема, называемые квазиоптимальными [3]. При этом возникает состояние неопределенности, когда искаженный сигнал трудно отнести к какому-либо из возможных переданных сигналов, и вероятность ошибки при этом значительно повышается [7]. Наличие таких состояний учитывается «мягкой» схемой принятия решения, которая увеличивает объем информации для обработки и анализа за счет введения дополнительных состояний канала (в дополнение к состояниям, связанным с передачей канальных символов, в частности, «0» или «1»). Поэтому для учета и последующего снятия неопределенности при принятии решения как в ПРС, так и в ВРС, эффективным представляется применение математического аппарата нечетких множеств и методов нечеткой логики [8, 9]. Это позволит увеличить эффективность и достоверность применяемых алгоритмов мягкого декодирования при определенном сочетании помех и искажений. Поэтому далее будут представлены результаты разработки,

исследования и реализации метода мягкого декодирования и принятия решения на уровне элементарных сигналов (канальных символов) в приемных устройствах элементов РИУС на основе аппарата и методов нечеткой логики.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание и анализ искажений сигналов. Различают следующие искажения, вносимые помехами в элементарный сигнал (рис. 1): краевые искажения (дребезг фронтов) и дробления [3].

Краевые искажения могут возникать вследствие затухания сигнала за счет уменьшения амплитуд высокочастотных гармоник, формирующих крутизну фронтов импульса. Также подобные виды искажения возникают вследствие изменения таких параметров импульса, как длительность и начальная фаза, а также из-за разрегулировки параметров аппаратуры. Дробления в элементарном сигнале появляются под воздействием внешних или внутренних импульсных помех.

На рис. 1 показаны примеры искажений, вносимых в элементарный сигнал (прямоугольный импульс заданной амплитуды U^1 и длительности τ), а также комментарии к каждому примеру [8]:

1 – идеальный импульс (формируется передатчиком на входе канала связи), имеет значение двоичного символа «1»;

2 – дребезг фронтов, возникает за счет подавления помехами высокочастотных составляющих импульса, интерпретируется как «1»;

3 – сужение импульса, возникает при наложении аддитивной импульсной помехи отрицательной полярности, интерпретируется как «1»;

4 – расширение импульса, возникает при наложении аддитивной импульсной помехи положительной полярности, интерпретируется как «1»;

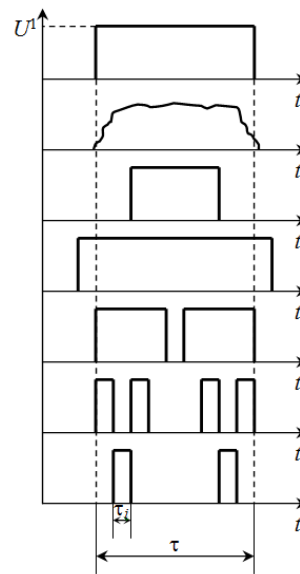
5 – дробление, характеризуется «малым» количеством импульсов (2–4) «большой» длины (в 3–5 раз меньше τ), интерпретируется как «1»;

6 – дробление, характеризуется «большим» количеством импульсов (>4) «малой» длины (на порядок меньше τ), интерпретируется как «1»;

7 – дробление, характеризуется «малым» количеством импульсов (2–4) «малой» длины (на порядок меньше τ), интерпретируется как «0».

Для полноты описания искажений необходимо добавить еще одну составляющую – величину амплитуды импульса. Ее предлагается использовать для формирования условия, по которому принимается решение о наличии или отсутствии импульса, например, по превышению среднего значения амплитуды заданного порога, например, $U^1/2$. При выполнении данного условия продолжается анализ искажений по предложенному выше подходу.

Для выделения элементарных сообщений из сигналов с указанными выше искажениями применяют квазиоптимальные способы приема, максимально учитывающие характер искажений [3].



а

Элементарный сигнал		
	Характеристика	Значение
1	Идеальный импульс	«1»
2	Дребезг фронтов	«1»
3	Сужение импульса	«1»
4	Расширение импульса	«1»
5	Дробление (N – малое, L – большое)	«1»
6	Дробление (N – большое, L – малое)	«1»
7	Дробление (N – малое, L – малое)	«0»

б

Рисунок 1 – Искажения импульса: иллюстрация (а) и комментарии (б)

Для борьбы с краевыми искажениями разработан метод приема по огибающей (или стробирования с определенным фазовым сдвигом). Он заключается в том, что прием импульса осуществляется с определенным фазовым сдвигом относительно временной метки начала импульса.

Для борьбы с искажениями типа дробления импульсов применяется интегральный прием. В указанном способе подсчитывается количество импульсов небольшой (значительно меньшей τ) длительности. Если количество таких импульсов больше определенного порогового значения, то принимается решение о формировании импульса, в противном случае – об отсутствии импульса (паузе). При другой реализации данного способа приема проводится накопление (ана-

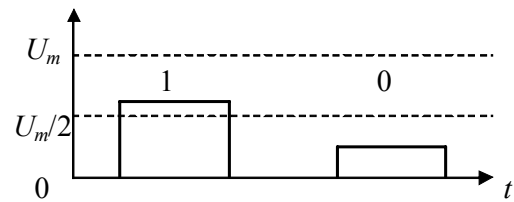
логовое суммирование), а затем – анализ на превышение порогового значения [10]

В работе предлагается метод принятия решения, учитывающий наличие искажений обоих типов. Он построен на основе теории нечетких множеств и методов нечеткой логики. Данный метод предполагает снижение вычислительной сложности за счет использования арифметических операций, а также возможность адаптации параметров модели принятия решения к изменению внешних условий (изменение параметров модели ошибок в канале связи, повышение требований к достоверности и т. п.).

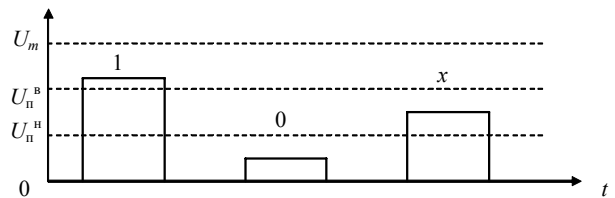
Классификация и анализ модели ошибок и способов принятия решения на уровне элементарного сигнала (символа). Важным этапом построения системы передачи информации с заданными показателями надежности (достоверности) является выбор модели ошибок и определение основных показателей качества (например, вероятность битовой ошибки) [6]. Для этого проводится продолжительное и разнообразное тестирование исследуемых каналов, после чего выполняется подробный анализ, построение моделей каналов связи и расчет показателей качества для данной системы передачи информации [11]. Полученные параметры в дальнейшем используются на этапах проектирования, эксплуатации и модернизации (update или upgrade).

Для обеспечения заданного уровня качества на каждом этапе важно выбрать адекватный способ принятия решения, который в современных системах передачи реализуется либо по «жесткой», либо по «мягкой» схеме [4]. Рассмотрим их особенности для каждого из указанных этапов приема.

Жесткое принятие решения работает в случае, когда входной и выходной алфавиты канала связи совпадают (например, двоичный канал 2×2 – на входе и на выходе канала символы из алфавита $\{«0»; «1»\}$). Этот способ более прост в реализации, но менее точен при наличии ошибок, близких по значению к порогу принятия решения (рис. 2а). При мягком способе декодирования на уровне сигнала размерность алфавита на выходе канала больше, чем на входе (например, 2×3 – на входе канала символы из алфавита $\{«0»; «1»\}$, а на выходе – из алфавита $\{«0»; «1»; «x»\}$, канал со стиранием). Выходной алфавит КС расширяется за счет введения символа неопределенности, фиксирующего место ошибки (рис. 2б). На уровне приема сообщений мягкое принятие решения заключается в итеративной процедуре декодирования с анализом на каждом этапе [7]. Такой способ более сложен в реализации, приводит к задержкам, но имеет лучшие характеристики достоверности. Возникающие при анализе неопределенности в принятии решения могут быть эффективно учтены за счет использования теории нечетких множеств и методов нечеткой логики, что при определенных условиях позволит реализовать эффективные варианты ПРС, адаптирующиеся к характеристикам помех и условий приема [3].



а



б

Рисунок 2 – Модели принятия решения: а – «жесткая» (2×2); б – «мягкая» (2×3)

Недостатком модели является достаточно низкая точность оценки вероятностных характеристик канала связи на уровне передачи сообщений при таком значении помехи и ее влияния на элементарный сигнал, что искаженный сигнал отличается от эталонных (базисных) значений элементарных сигналов на примерно одинаковую величину [11]. При этом выделяется зона неопределенности, попадание в которую свидетельствует о существенном значении помехи, но затрудняет ее идентификацию. Тогда говорят о «мягкой» схеме принятия решения.

Наиболее простая модель ошибок для использования мягкой схемы принятия решения – канал со стиранием (2×3). В нем выходной алфавит расширяется за счет введения символа стирания – «x», который формируется при попадании значения принятого символа в зону неопределенности (рис. 2б). Для исправления ошибок стирания требуется вводить дополнительную избыточность в сообщении и использовать специальные алгоритмы коррекции.

Из литературы [4] известно, что модели ошибок КС размерности более чем 2×8 не дают существенно увеличения, но существенно усложняется алгоритм обработки и аппаратно-программная реализация декодирующего устройства. Преимущество мягкой схемы принятия решения (уменьшение сложности алгоритма дешифрации, простота аппаратно-программной реализации, улучшение вероятностных оценок достоверности и т.п.) может дать применение теории нечетких множеств и методов нечеткой логики.

Разработка математической модели и алгоритма принятия решения в ПРС с использованием аппарата и методов нечеткой логики. Введем основные термины теории нечетких множеств применительно к рассматриваемой предметной области [11]:

– ЛП: элементарный сигнал (канальный символ на выходе канала связи);

– терм-множество: множество значений (термов) ЛП, определяемое размерностью алфавита на выходе канала связи;

– ФП: характеризует степень принадлежности значения термина заданному нечеткому множеству, определяется выбранной моделью ошибок КС.

Рассмотрим примеры ФП для разных моделей каналов связи (2×2) (треугольные: рис. 3а – без перекрытия ФП (без неопределенности), пороговое значение 0,5; рис. 3б – с частичным перекрытием ФП, пороговые значения 0,25 и 0,75 для термов «1» и «0» соответственно; рис. 3в – с полным перекрытием ФП, пороговые значения 0 и 1 для термов «1» и «0» соответственно) и (2×3) (трапециевидные: рис. 3г; гауссовы: рис. 3д; синглетон: рис. 3е – для термов «0», «1» и «х»). По оси абсцисс откладываются множества входных значений сигнала, в рассматриваемом случае – нормализованных для удобства представления в диапазоне [0; 1].

Примечание. Примеры ФП на рис. 3 реализованы в среде MathWorks MatLab, расширение Fuzzy Logic Toolbox [12, 13]. Задавая разные функции принадлежности и варьируя их параметры, можно получать различные значения для принятия решения, сравнивать их друг с другом, выбирая наиболее подходящие с учетом заданных ограничений.

Описание квазиоптимального приема с использованием теории нечетких множеств и методов нечеткой логики. Введем описание параметров предлагаемой модели принятия решения в терминах нечетких множеств [14].

Входные ЛП:

N – терм-множество {«малое», «большое»};

L – терм-множество {«малая», «большая»};

H – терм-множество {«малая», «большая»}.

ФП входных ЛП: треугольные.

Выходная ЛП: Двоичный символ, терм-множество {«0»; «1»}.

ФП выходной ЛП: синглетон.

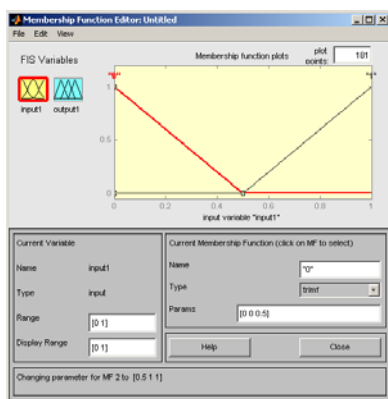
Матрица принятия решения: приведена в табл. 1, построена на основании анализа всех вариантов значений ЛП.

Продукционные правила (по количеству непустых строк в матрице принятия решения):

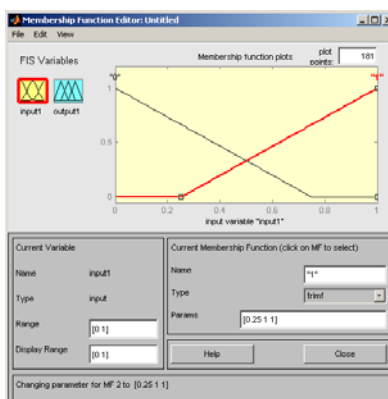
IF $N = \langle m \rangle$ AND $L = \langle m \rangle$ AND $H = \langle m \rangle$ THEN «0».

IF $N = \langle m \rangle$ AND $L = \langle b \rangle$ AND $H = \langle b \rangle$ THEN «0»...

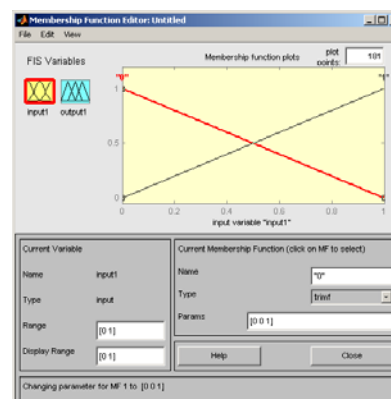
(количество правил определяется количеством строк в матрице принятия решения, ячейка «Иллюстрация» не равна «→», т.е. такое сочетание параметров на практике не встречается либо не учитывается).



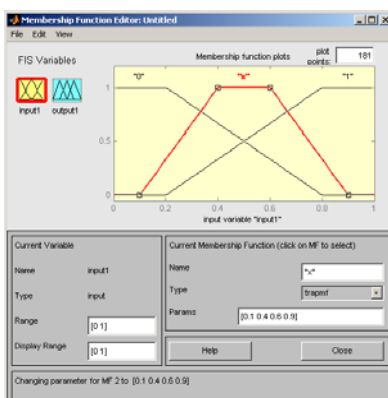
а



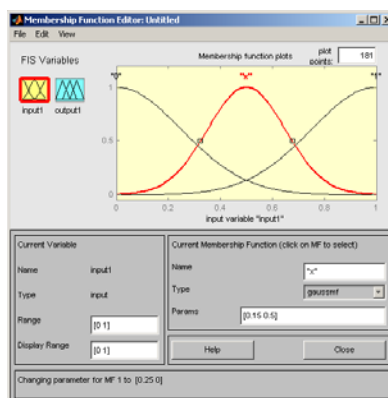
б



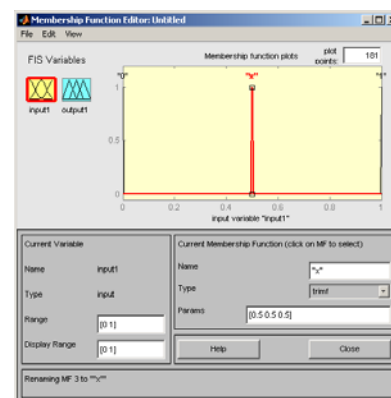
в



г



д



е

Рисунок 3 – Примеры ФП для описания ЛП «канальный символ»

Таблица 1 – Матрица принятия решения

№	Иллюстрация	N	L	H	Вывод
1		м	м	м	«0»
2		м	м	б	«0»
3		м	б	м	«0»
4		м	б	б	«1»
5		б	м	м	«0»
6		б	м	б	«1»
7	–	б	б	м	–
8	–	б	б	б	–

Далее предлагается следующий алгоритм принятия решения (основан на методе дефаззификации Л. Заде).

1. По заданным значениям результатов входных переменных определяются значения степеней принадлежности для всех термов (значение функции принадлежности терма для заданного значения универсума).
2. Выбираются правила, содержащие условия с ненулевыми степенями принадлежности (термы, которым соответствуют ненулевые значения ФП для заданных конкретных результатов).
3. На первом шаге логического вывода определяется степень принадлежности всего antecedента каждого правила (по функции минимума).
4. На втором шаге формирования нечеткого вывода определяется степень принадлежности терм выходной переменной (по функции максимума).
5. Для дефаззификации применяется метод центроида, который позволяет определить текущее значение выходной переменной для текущих значений входных лингвистических переменных. В результате определяется четкий результат, дающий информацию о значении выходной ЛП (канального символа).

Разработанная модель принятия решения положена в основу соответствующего устройства в составе приемника элементарных сигналов, структурная схема которого предложена далее.

На рис. 4 приведена обобщенная структурная схема приемного устройства физического уровня (ПРС), которая может быть использована в составе элементов распределенных систем управления [14].

Считается, что квазиоптимальным приемом при дроблениях является интегральный прием [3], и описываемый ниже метод является его модификацией. Способ интегрального приема основан на аналоговом суммировании (интегрировании) площадей импульсов дробления и сравнении получившейся площади с заданным пороговым значением. Предлагаемый способ приема, построенный на предложенном методе принятия решения на основе нечеткой логики, использует более простые структурные элементы, арифметический метод расчета параметров и несложный алгоритм принятия решения. Поэтому он более эффективно реализуется в приемниках в составе элементов РИУС в условиях ограничения аппаратно-программных ресурсов и рассматриваемой совокупности помех и искажений во встроенных и выделенных каналах и трактах РИУС.

Алгоритм работы устройства следующий. В схему поступает входной элементарный сигнал u , искаженный помехами разного типа (дребезг фронтов, дробление, их сочетание). Устройство синхронизации, стробируемое сигналами с генератора тактовых импульсов, управляет работой формирователя (задает заданную эталонную длительность элементарного сигнала τ , а также амплитуду импульса). Форматированный сигнал \tilde{u} поступает на пороговые элементы, определяющие начало и окончание каждого импульса дробления, которые появляются в результате искажения передаваемого элементарного сигнала. Узел определения параметров импульса дробления формирует импульс длительностью τ_i . Узел предварительной обработки фиксирует параметры каждого импульса дробления (длительность, амплитуду), а также подсчитывает их число.

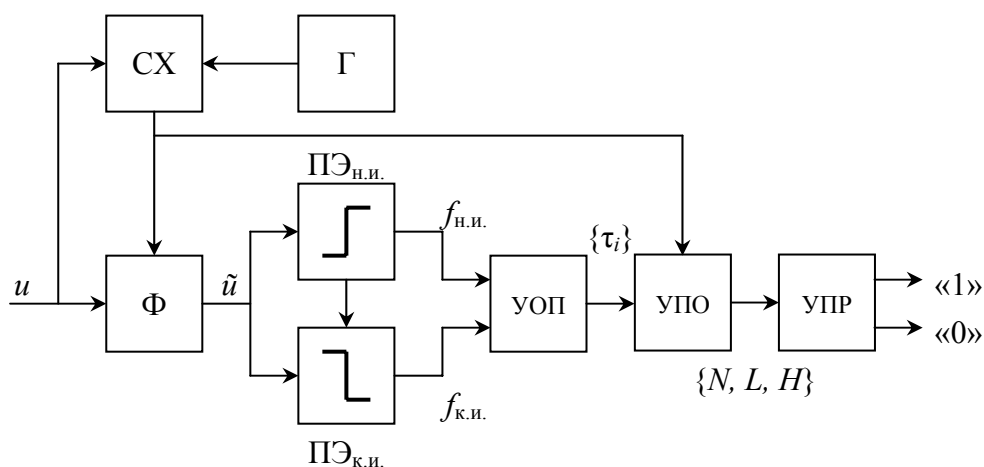


Рисунок 4 – Обобщенная структурная схема приемного устройства

После окончания интервала анализа, определяемого заданной длительностью элементарного сигнала τ , производится расчет обобщенных параметров сигнала: $N; L; H$. Они являются входными параметрами для узла принятия решения, реализующего формирование четкого вывода о принятом элементарном сигнале. Обобщенная структурная схема приведена на рис. 5.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для исследования предложенного метода принятия решения в ПРС построена модель в среде Fuzzy Logic Toolbox (MathWorks MatLab), далее приведены элементы модели и исследования: рис. 6а – общий вид модели; рис. 6б – задание ФП для входных и выходных ЛП (задан диапазон входных значений от 0 (м) до 5 (б), см. табл. 1); рис. 6в – задание продукционных правил.

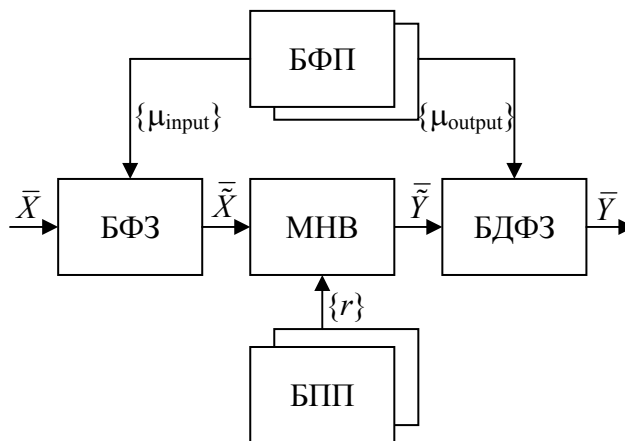


Рисунок 5 – Обобщенная структурная схема УПР

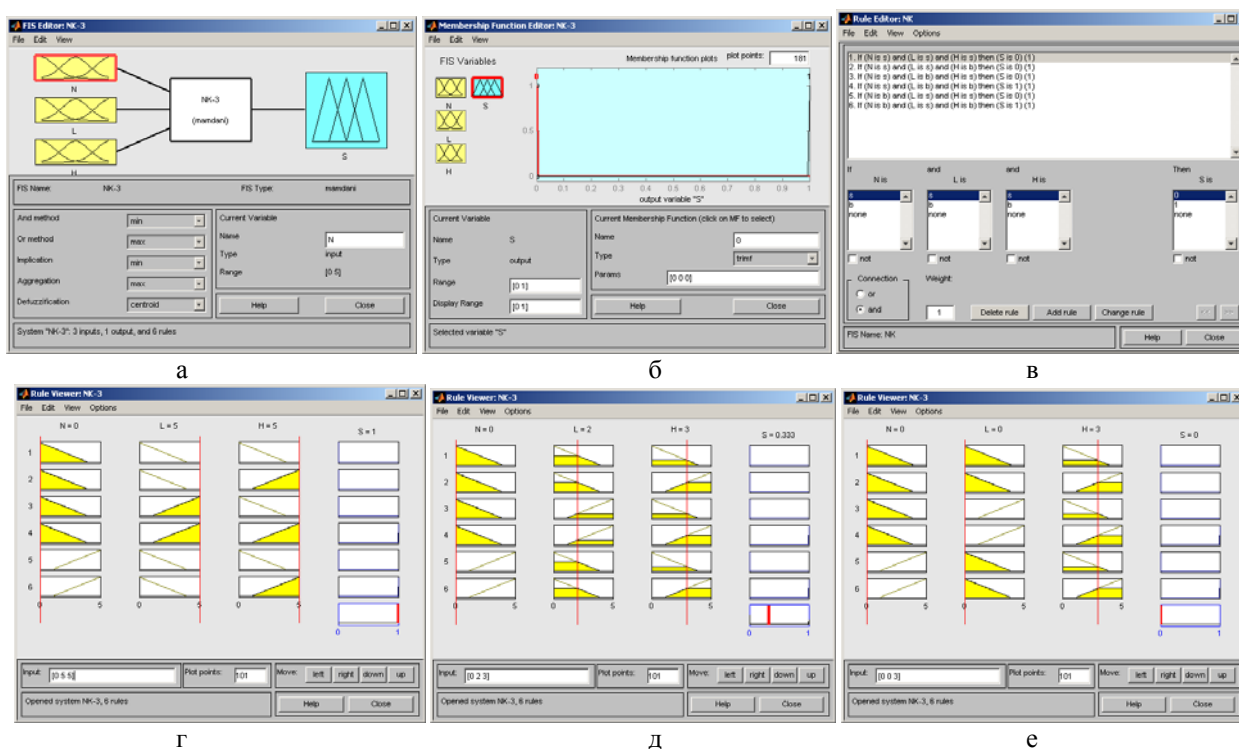


Рисунок 6 – Модель принятия решения в Fuzzy Logic Toolbox

На рис. 6г,д,е представлены разные варианты принятия решения для выходной ЛП по заданному набору значений входных ЛП:

- принят один импульс дробления ($N = 0$) «большой» длительности ($L = 1$) и «большой» высоты ($H = 1$), что интерпретируется как «1» ($S = 1$);
- принят один импульс дробления ($N = 0$) «средней» длительности ($L = 2$) и «средней» высоты ($H = 3$), что интерпретируется как «0» ($S = 0$);
- принят один импульс дробления ($N = 0$) «малой» длительности ($L = 1$) и «средней» высоты ($H = 3$), что интерпретируется как «1» ($S = 0$).

В результате формулируется четкий вывод с использованием выбранного алгоритма дефазификации.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Проанализируем возможности предложенного способа квазиоптимального приема по улучшению количественных показателей достоверности передачи информации и увеличению ее эффективности.

1. Сохранение заданного показателя достоверности принятия решения на уровне символа при уменьшении качества передачи по каналу (снижение отношения «сигнал/шум»), что повышает эффективность системы передачи информации.

Пример 1. Для количественной оценки достоверности можно воспользоваться определением соответствия вероятности ошибочного принятия решения об уровне элементарного сигнала (вероятность битовой ошибки)

при конкретном отношении «сигнал/помеха» ρ . Например, выполним расчет для следующих условий:

- сигнал: импульс амплитудой $U_c = 5$ В и длительностью $\tau_c = 1$ мкс (символ «1»);
- помеха: два импульса амплитудой $U_n = -5$ В и длительностью $\tau_n = 0,2$ мкс каждый:

$$\rho = 10 \lg \frac{P_c}{P_n} = 10 \lg \frac{U_c^2 \cdot \tau_c}{2 \cdot U_n^2 \cdot \tau_n} =$$

$$= 10 \lg \frac{5^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 5^2 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 10 \cdot \lg 2,5 = 10 \cdot 0,4 = 4 \text{ дБ.}$$

При этом при помощи предложенного алгоритма принятия решения и схемы декодирования будет сделан правильный вывод о приеме сигнала «1», несмотря на малое для систем связи отношение «сигнал/шум» (например, для вероятности ошибки 10^{-3} и простого способа цифрового линейного кодирования (NRZ, AMI, HDB3 и т.п.) необходимо значение $\rho > 20$ дБ). Для данного примера параметр ρ значительно меньше при сохранении порядка величины достоверности принятия решения (для рассматриваемой модели искажений типа дробления). Но для обеспечения достоверности технического диагностирования параметр эффективности не является ключевым, поэтому рассмотрим следующий пример.

2. Увеличение достоверности принятия решения на уровне символа при сохранении уровня качества передачи в канале (отношении «сигнал/шум»), что позволяет увеличить вероятность правильной передачи диагностической информации.

Пример 2. Рассмотрим передачу диагностической информации по встроенному каналу в оборудовании ОГМ-30Е (ПАО «Морион», г. Пермь), реализуемой устройствами управления и мониторинга УМ-120М. Для кадра служебной информации длиной 4 байта ($n = 32$ бит) до внедрения предложенной в работе схемы декодирования вероятность ошибки в символе P была порядка 10^{-3} . Следовательно, можно оценить вероятность правильной передачи сообщения (без применения дополнительного помехоустойчивого кодирования) следующим образом [3]:

$$P_n = (1 - P)^n = (1 - 10^{-3})^{32} \approx 0,97.$$

Предложенный способ декодирования, реализованный в информационном и аппаратно-программном обеспечении устройства управления, позволил уменьшить вероятность ошибки в символе P до величины порядка 10^{-5} , что определено в результате тестирования при имитации воздействия помех разного уровня и вида. Таким образом, вероятность правильной передачи сообщения в данном случае равна:

$$P_n = (1 - P)^n = (1 - 10^{-5})^{32} \approx 0,9997.$$

Для избыточного кода [3] расчет выполняется по предложенной методике.

Приведем для подтверждения график зависимости вероятности правильной передачи от вероятности ошибки в символе, что подтверждает значимость улучшения достоверности принятия решения на уровне элементарного сигнала (рис. 7). Следовательно, увеличение вероятности правильной передачи информации, в первую очередь – диагностической, позволяет соответственно увеличить достоверность технического диагностирования.

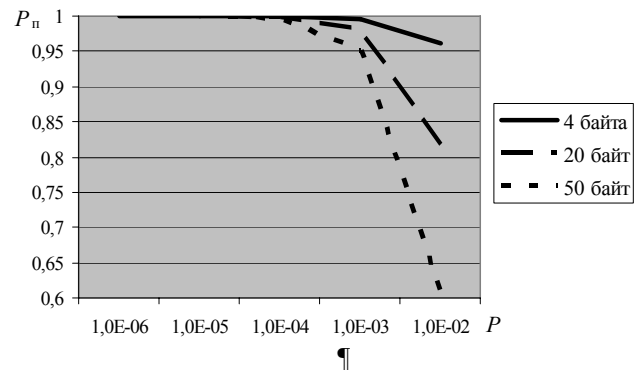


Рисунок 7 – Количественная оценка достоверности передачи информации

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Применение разработанного метода принятия решения на основе аппарата и методов нечеткой логики предлагается использовать в устройстве принятия решения на уровне элементарных сигналов в обобщенной структурной схеме приемного устройства в составе элементов РИУС. Это позволит реализовать заданные показатели достоверности, при этом будет обеспечено снижение вычислительной сложности за счет использования арифметических операций, а также возможность адаптации параметров модели принятия решения к изменению внешних условий.

Предложенные алгоритмы и структуры реализованы и исследованы при помощи разработанных программных моделей. Показано, что применение методов нечеткой логики для мягкого декодирования сигналов и сообщений позволяет повысить показатели достоверности, а также снизить вычислительную сложность алгоритмов декодирования и принятия решения, что положительным образом сказывается на увеличении быстродействия при аппаратно-программной (программируемые логические интегральные схемы) и программной (микроконтроллер) реализации соответствующих функций.

ВЫВОДЫ

В статье предложены и проанализированы результаты применения математического аппарата нечетких множеств и методов нечеткой логики для описания моделей ошибок в каналах и трактах передачи информации систем управления, разработки и реализации алгоритмов мягкого декодирования элементарных сигналов.

1. Выполнен анализ помех, возникающих в реальном канале связи, проанализированы способы их описания. Показано, что реальные помехи часто не вписываются в наиболее распространенную модель «белого шума», что требует разработки и применения специальных методов квазиоптимального приема. Выполнен анализ моделей ошибок с учетом «жесткого» и «мягкого» способов принятия решения на уровне элементарного сигнала. Указано, что «мягкий» способ адекватнее учитывает возникающую неопределенность, что приводит к улучшению достоверности приема (уменьшению вероятности ошибки в символе).

2. Разработаны математическая модель и алгоритм «мягкого» принятия решения в первой решающей схеме (приемнике элементарных сигналов) с использованием аппарата и методов нечеткой логики. Выполнена реализация предложенной модели в среде MathWorks MatLab, пакет Fuzzy Logic Toolbox. Проведенное моделирование показало, что предложенный алгоритм мягкого декодирования обладает повышенными показателями достоверности.

3. Построена обобщенная структурная схема квазиоптимального приемника элементарных сигналов и описан алгоритм его функционирования. Разработан и описан алгоритм устройства, его основных компонентов, а также сигналы и переменные, необходимые для задания параметров модели в терминах нечеткой логики, выполнено моделирование и исследование предложенной схемы. Приведены количественные оценки повышения достоверности при использовании предложенных методов мягкого «декодирования».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 265 с.
2. Кон Е. Л. Подходы к тестовому диагностированию цифровых устройств / Е. Л. Кон, В. И. Фрейман // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2012. – № 6. – С. 231–241.
3. Кон Е. Л. Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационно-управляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы,

структуры / Е. Л. Кон, В. И. Фрейман. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 317 с.

4. Sklar B. Digital Communications. Fundamentals and Applications. Second Edition / B. Sklar. – New Jersey, Prentice Hall Ptr.
5. Пахомов Г. И. Теория электрической связи. Основные понятия / Г. И. Пахомов, В. И. Фрейман. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 115 с.
6. Финк Л. М. Сигналы, помехи, ошибки / Л. М. Финк. – М. : Радио и связь, 1984. – 256 с.
7. Гладких А. А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи / А. А. Гладких. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 379 с.
8. Freyman V. Application of Fuzzy Logic for Decoding and Evaluation of Results within the Process of Information System Components Diagnosis / V. Freyman, M. KavaleroV // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElCon-Rus), February 1–3, 2017. – P. 134–139.
9. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control / A. Piegat. – Physica Verlag, A Springer Verlag Company.
10. Freyman V. Research and Application of Noise Stability Providing Methods at Information and Control Systems / V. Freyman, I. Bezukladnikov // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElConRus), February 1–3, 2017. – P. 831–837.
11. Фрейман В. И. Применение нечеткой логики для мягкого декодирования канальных символов в первой решающей схеме приемных устройств / В. И. Фрейман // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2017. – № 6. – С. 49–54.
12. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.: ил.
13. MATLAB Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата обращения: 14.04.2018).
14. Kon E. L. Soft decoding based fuzzy logic for processing of elementary signals within data transmission channels of distributed control systems / E. L. Kon, V. I. Freyman, A. A. Yuzhakov // Proceedings of the 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). – P. 1–6. DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997531.

Статья поступила в редакцию 24.04.2018.
После доработки 14.05.2018.

УДК 621.391:004.052

МЕТОДИ І АЛГОРИТИ М'ЯКОГО ДЕКОДУВАННЯ СИГНАЛІВ В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ МІЖ ЕЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Фрейман В. І. – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри «Автоматика і телемеханіка», Пермський національний науково-дослідний політехнічний університет, м. Пермь, Росія.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вирішено завдання підвищення достовірності передачі інформації в каналах і трактах систем управління на тлі дії взаємозв'язків між різними видами та видами. Об'єкт дослідження – приймальний пристрій (декодер канальних символів), предмет дослідження – моделі, методи та алгоритми обробки та прийняття рішень на рівні елементарних сигналів (канальних символів). Мета роботи – створення та дослідження методів та алгоритмів «м'якого» декодування елементарних сигналів для забезпечення достовірності передачі інформації по вбудованим і виділеним каналам і трактам систем управління.

Метод. Використано математичний апарат нечітких множин для опису помилок, що виникають в каналах і трактах передачі інформації між елементами систем управління. Реалізовані методи та алгоритми «м'якого» декодування (дають більшу інформацію для прийняття рішення, ніж «жорстка» схема прийняття рішення) в першій вирішувальній схемі прий-

© Фрейман В. І., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-22

мальних пристроїв у складі системно-програмних елементів систем управління. Виконано програмне моделювання запропонованого способу прийняття рішення, оснований на методах нечіткої логіки.

Результати. Розроблено структурну схему та алгоритм роботи квазіоптимального приймача елементарних сигналів, оригінальність якого полягає у застосуванні методів нечіткої логіки для прийняття рішень. Створено та досліджено алгоритм прийняття рішення в середовищі MathWorks Fuzzy Logic Toolbox.

Висновки. Проведені в роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки про те, що запропонована м'яка схема декодування: забезпечує більшу «гнучкість» при прийнятті рішення, що позитивно впливає на достовірність передачі інформації; не вимагає введення та використання багатозначної логіки (наприклад, символ «x» для каналу 2×3, символи «1b» та «0b» для каналу 2×4, символи «0» ... «7» для каналу 2×8), що полегшує реалізацію алгоритму декодування; дозволяє проводити арифметичні, а не логічні, розрахунки, що знижує обчислювальну складність алгоритму прийняття рішення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: каналний символ, декодування, прийняття рішення, нечетка логіка, моделювання, вади, квазіоптимальний прийом.

UDC 621.391:004.052

METHODS AND ALGORITHMS OF SOFT DECODING FOR SIGNALS WITHIN INFORMATION TRANSMISSION CHANNELS BETWEEN CONTROL SYSTEMS ELEMENTS

Freyman V. I. – PhD, professor of department «Automatics and telemechanics», Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

ABSTRACT

Context. The problems of increasing the reliability of information transmission in the channels of control systems against the background of the impact of a set of a different nature and type interference are solved. The object of research is receiving device (channel symbols decoder), the subjects of research are models, methods and algorithms of proceeding and decision making for elementary signals (channels symbols). The goal is creation and research of methods and algorithms of elementary signals «soft» decoding for providing of information transmission reliability in the build-in and dedicated channels of control systems.

Method. The math methods of fuzzy sets for description of errors within information transmission channels between control systems elements is used. The methods and algorithms of «soft» decoding within first decision device of control systems elements are realized (this methods allows get more information for decision making then «hard» method of decision making). The program simulation of proposed method of decision making based on fuzzy logic is executed.

Results. The structure scheme and functioning algorithm of quasi-optimal receiver of elementary signal with original using methods of fuzzy logic for decision making are created. The algorithm of decision making is researched with using the simulation tool MathWorks Fuzzy Logic Toolbox.

Conclusions. The research results allows to make the next conclusions that proposed «soft» decoding method provides greater «flexibility» for decision making that positively affects the reliability of information transmission; don't require the introduction and use of multi-valued logic (for example, the symbol «x» for the model of the channel 2×3, the symbols «1b» and «0b» for the model of the channel 2×4, the symbols «0» ... «7» for the model of the channel 2×8) that facilitates the implementation of the decoding algorithm; allows to execute arithmetic (not logical) calculation for decreasing a computational difficult of decision making algorithm.

KEYWORDS: channel symbol, decoding, decision making, fuzzy logic, simulation, quasi-optimal receiving.

REFERENCES

1. Baklanov I. G. Testing and diagnostics of telecommunication systems. EKO-TRENDS Publ., 2001, 265 p.
2. Kon E. L., Freyman V. I. Approaches to test diagnostics of digital devices, The News of Perm national research polytechnic university. Electronics, information technologies, control systems, 2012, No. 6, pp. 231–241.
3. Kon E. L., Freyman V. I. The theory of telecommunications. The noise stability data transmission within information and control and telecommunication systems: models, algorithms, structures. PSTU Publ., 2007, 317 p.
4. Sklar B. Digital Communications. Fundamentals and Applications. Second Edition. New Jersey, Prentice Hall Ptr.
5. Pahomov G. I., Freyman V. I. The theory of telecommunications. The general terms. PSTU Publ., 2007, 115 p.
6. Fink L. M. Signals, noise, errors. Radio and communication Publ., 1984, 256 p.
7. Gladkih A. A. Fundamentals of the theory of soft decoding of redundant codes in the erase channel of communication. USTU Publ., 2010, 379 p.
8. Freyman V., Kavalero M. Application of Fuzzy Logic for Decoding and Evaluation of Results within the Process of Information System Components Diagnosis, Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElConRus), February 1–3, 2017, pp. 134–139.
9. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control / A. Piegat. Physica Verlag, A Springer Verlag Company.
10. Freyman V., Bezukladnikov I. Research and Application of Noise Stability Providing Methods at Information and Control Systems / V. Freyman, // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElConRus), February 1–3, 2017, pp. 831–837.
11. Freyman V. I. The application of fuzzy logic for channel symbols soft decoding at the first decision node of receiving devices, Neurocomputers: designing, application, 2017, No. 6, pp. 49–54.
12. Shtovba S. D. Designing of fuzzy systems with using MATLAB tools. Hotline-Telecom, 2007, 288 p.
13. MATLAB Documentation [electron resource]. URL: <http://www.mathworks.com/help/matlab/> (date of access: 14.04.2018).
14. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A. Soft decoding based fuzzy logic for processing of elementary signals within data transmission channels of distributed control systems, Proceedings of the 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO), pp. 1–6. DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997531.