

УДК 621.395

В.В. Кальников, Ю.И. Береснев

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЦИКЛОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ПОИСКОМ

Кальников Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент, окончил радиоинженерный факультет Киевского высшего военного инженерного училища связи им. М.И. Калинина, адъюнктуру. Главный специалист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Специализируется в области многоканальной электропроводной и волоконно-оптической связи. Имеет публикации, изобретения в области проектирования цифровых и волоконно-оптических систем передачи. [e-mail: mars@mv.ru].

Береснев Юрий Иванович, кандидат военных наук, окончил ВАС им. С.М. Буденного, адъюнктуру. Главный конструктор ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Специализируется в области организации и построения систем связи и обмена данными. Имеет публикации в области проектирования систем управления специального назначения. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

В статье представлена разработанная имитационная модель модифицированной системы цикловой синхронизации (СЦС) с параллельным поиском, позволяющая проводить моделирование с учетом высокой вероятности и пакетирования ошибок, эффекта проскальзывания цифрового сигнала, структуры синхрогрупп и их размещения в цикле. Учет этих факторов позволил увеличить адекватность имитационной модели реальным системам в ситуации воздействия интенсивных нестационарных помех. Представлены и проанализированы результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: имитационное моделирование, система цикловой синхронизации, алгоритм функционирования имитационной модели.

Abstract

The article presents a developed simulation model of modified cycle-phasing system with split seek, which allows simulating taking into account a high value of probability and packing of errors, effect of digital-signal slip structure of syncro-groups and their location in cycle. Taking these facts into account contributed to the increase of adequacy of the simulation model with respect to real systems in case of strong non-stationary noise impact. It also gives and analyses the results of the simulation.

Key words: simulation, cycle-phasing system, algorithm of simulation-model operation.

ВВЕДЕНИЕ

Основой электросвязи Российской Федерации является Единая сеть электросвязи (ЕСЭ) РФ, обеспечивающая предоставление услуг электросвязи пользователям на территории России и состоящая из следующих категорий сетей связи: общего пользования; выделенные; технологические, присоединенные к сети связи общего пользования; специального назначения и другие.

По способам организации каналов сети ЕСЭ разделяются на первичные и вторичные. Первичные сети ЕСЭ РФ предназначены для организации и предоставления во вторичные сети типовых сетевых трактов, каналов передачи и физических цепей.

В первичных сетях связи общего пользования ЕСЭ РФ интенсивно развиваются цифровые системы передачи (ЦСП) на основе синхронной цифровой иерархии, использующие в качестве основной среды распространения сигнала оптические волокна и создаваемые на их основе волоконно-оптические кабели. Такие системы характеризуются очень низкой вероятностью ошибки (10^{-9} – 10^{-11}).

Однако с целью повышения живучести, оперативности развертывания, функционирования и восстановления (в случаях аварий на волоконно-оптических линиях связи, при чрезвычайных ситуациях и др.) развитие первичной сети целесообразно осуществлять за счет комплексного применения как проводных средств на основе волоконно-оптических кабелей, так и радиосредств. При этом радиосредства могут быть построены на основе радиорелейных линий прямой видимости и тропосферных, спутниковых линий с искусственными спутниками Земли на геостационарной, эллиптической и низкой орбитах, атмосферных оптических линий связи, где используются, как правило, ЦСП плезиохронной иерархии, работающие по цифровым трактам, характеризующимся высокой вероятностью ошибки ($P_{\text{ош}} > 10^{-3}$), пакетированием ошибок, фазовыми дрожаниями, задержками, проскальзываниями и т. д.

Функционирование ЦСП невозможно без обеспечения синхронности и синфазности процессов преобразования и обработки сигналов. Система тактовой синхронизации обеспечивает равенство скоростей обработки сигналов на передающих и приемных станциях ЦСП. Равенство фазовых соотношений между циклами временного объеди-

нения и разделения цифровых сигналов реализуются в ЦСП с помощью систем цикловой синхронизации, что обеспечивает правильное разделение группового потока на канальные сигналы. Необходимо отметить, что даже при устойчивой работе системы тактовой синхронизации нарушение синхронизации по циклам влечет за собой сбой работы ЦСП и потерю связи во всех каналах.

В настоящее время большинство СЦС, находящихся в эксплуатации, построены по принципу скользящего поиска синхросигнала (СС) с адаптацией к помеховой обстановке. Однако в условиях интенсивных помех они имеют невысокие показатели по быстродействию и помехоустойчивости. Более перспективными в этом смысле являются СЦС с параллельным поиском, но известные технические решения таких систем уже не удовлетворяют современным требованиям к их помехоустойчивости. Поэтому задача проектирования СЦС, обеспечивающих функционирование ЦСП в условиях интенсивных нестационарных помех, является актуальной. Одним из ключевых вопросов при проектировании ЦСП является разработка их математических моделей.

Аналитическое моделирование СЦС [1] проводится в стационарном режиме без учета динамики взаимодействия элементов, составляющих систему. Поэтому для более полного исследования системы оно должно быть дополнено имитационным моделированием. Сущность последнего заключается в воспроизведении процесса функционирования СЦС во времени с имитацией элементарных событий, составляющих процесс, с сохранением их логической структуры, последовательности протекания во времени и взаимосвязей между элементами системы. Имитационное моделирование дает возможность исследовать СЦС практически в любых условиях ее работы и получить сведения о состоянии процесса функционирования в определенные промежутки времени.

Исследование функционирования и определение основных характеристик СЦС с использованием метода имитационного моделирования на ЭВМ производилось ранее в работах [2, 3], где при разработке моделей использовался блочный способ представления систем, т. е. разбиение СЦС на подсистемы (блоки) и формирование общей модели СЦС из моделей ее отдельных элементов с учетом их взаимодействия. При формализованном описании моделируемых систем процесс функционирования разделялся на характерные этапы, отражающие только один из показателей оригинала: помехоустойчивость или быстродействие. Для получения численных оценок каждого показателя СЦС разрабатывалась конкретная частная модель.

Вместе с тем подробный анализ имитационных моделей СЦС с параллельным поиском синхросигнала показал, что в работе [2] производилось имитационное моделирование только подсистемы поиска. При этом подсистема удержания в моделируемой СЦС не вводилась, а помехоустойчивость оценивалась вероятностью обнаружения ложного синхросигнала. В результате моделирования в работе [2] был сделан вывод о достаточно высоком быстродействии, но низкой помехоустойчивости СЦС с параллельным поиском к вероятности ошибки в тракте передачи по сравнению с неадаптивной и адаптивной СЦС.

Отметим, что в работе [3] в имитационной модели СЦС с параллельным поиском процесс функционирования подсистем поиска и удержания не соответствует процессу функционирования аналогичных устройств в предлагаемой СЦС [4]. Это связано с тем, что в подсистеме поиска исследуемой СЦС по сравнению с подсистемой поиска, предложенной в [3], изменен принцип формирования отклика опознавателя циклового синхросигнала, а в подсистеме удержания изменен принцип определения сбоев циклового синхронизма. Кроме того, при моделировании воздействия помех на цикл передачи цифровой системы не учитывается группирование ошибок, влияние которых особенно чувствительно на процессы поддержания и восстановления цикловой синхронизации.

Таким образом, для исследования функционирования СЦС с параллельным поиском необходимо построение имитационной модели с учетом отмеченных ранее достоинств и недостатков известных имитационных моделей СЦС.

1 ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЦИКЛОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ПОИСКОМ СИНХРОСИГНАЛА

При создании имитационной модели учитывались следующие факторы:

- способ построения цикла передачи, включающего символы синхросигнала, информационные и служебные символы цикла;
- способ передачи синхросигнала (сосредоточенный или рассредоточенный) и его структура;
- результат воздействия помех на символы цикла передачи, включая группирование ошибок, для имитации ложного сбоя синхронизма на приемной стороне;
- механизм воздействия проскальзывания на периодичность формирования цикла передачи для имитации истинного сбоя синхронизма на приемной стороне;
- алгоритм работы моделируемой подсистемы поиска в режиме поиска и контроля состояния синхронизма;
- алгоритм работы моделируемой подсистемы удержания в режиме поиска и контроля состояния синхронизма;
- механизм взаимодействия подсистем поиска и удержания в различных режимах функционирования моделируемого приемника синхросигнала.

Блок-схема обобщенного алгоритма функционирования имитационной модели исследуемой СЦС с параллельным поиском представлена на рисунке 1.

Исходными данными имитационной модели являются: длина цикла передачи N , длина синхросигнала m и его структура $\{m\}$, весовой коэффициент отклика на синхросигнал w , порог обнаружения синхросигнала d_{oc} , порог определения сбоя синхронизма d_{nc} , допустимое число искаженных синхросимволов k_{don} , квазипериод внесения ошибок $T_{ou} = 1/P_{ou}$ (P_{ou} – вероятность одиночной ошибки), вероятность проскальзывания P_{np} , максимальная величина пакета ошибок $n_{ou\ max}$, вероятность ошибки в пакете ошибок $P_{n\ ou}$, число испытаний в одном эксперименте NI^* . Выходными данными в зависимости от выбранного режима моделирования являются среднее время удержания синхронизма \bar{L}_y или среднее время восстановления синхронизма \bar{L}_s .

Блоки обобщенного алгоритма имитационной модели

имеют следующее функциональное назначение:

- блок 1 – ввод исходных данных;
- блок 2 – установка начальных значений переменных;
- блок 3 – формирование очередного символа цикла передачи;
- блок 4 – имитация проскальзывания цифрового сигнала и воздействия помех на символы цикла передачи;
- блок 5 – опознавание символов циклового синхросигнала;
- блоки 6 и 7 – имитация параллельного функционирования подсистем удержания и поиска в режиме удержания и восстановления состояния синхронизма;
- блок 8 – проверка условия обнаружения синхросигнала подсистемой поиска при определении сбоя циклового синхронизма (число накопленных откликов опознава-

теля синхросигнала α_{ex} не превышает порога определения сбоя синхронизма d_{nc});

- блок 9 – моделирование перестройки генераторного оборудования (ГО) при выполнении условий в блоке 8;
- блок 10 – накопление статистических данных L_{ej} или L_{yj} , где j – число испытаний в одном эксперименте;
- блоки 11, 12 – подсчет числа проведенных испытаний в одном эксперименте NI и контроль окончания моделирования при превышении заданного значения NI^* ;
- блок 13 – расчет статистических параметров, например, определение средних значений времени восстановления \bar{L}_e или удержания \bar{L}_y циклового синхронизма;
- блок 14 – вывод результатов значений среднего времени восстановления \bar{L}_e или удержания \bar{L}_y циклового синхронизма.

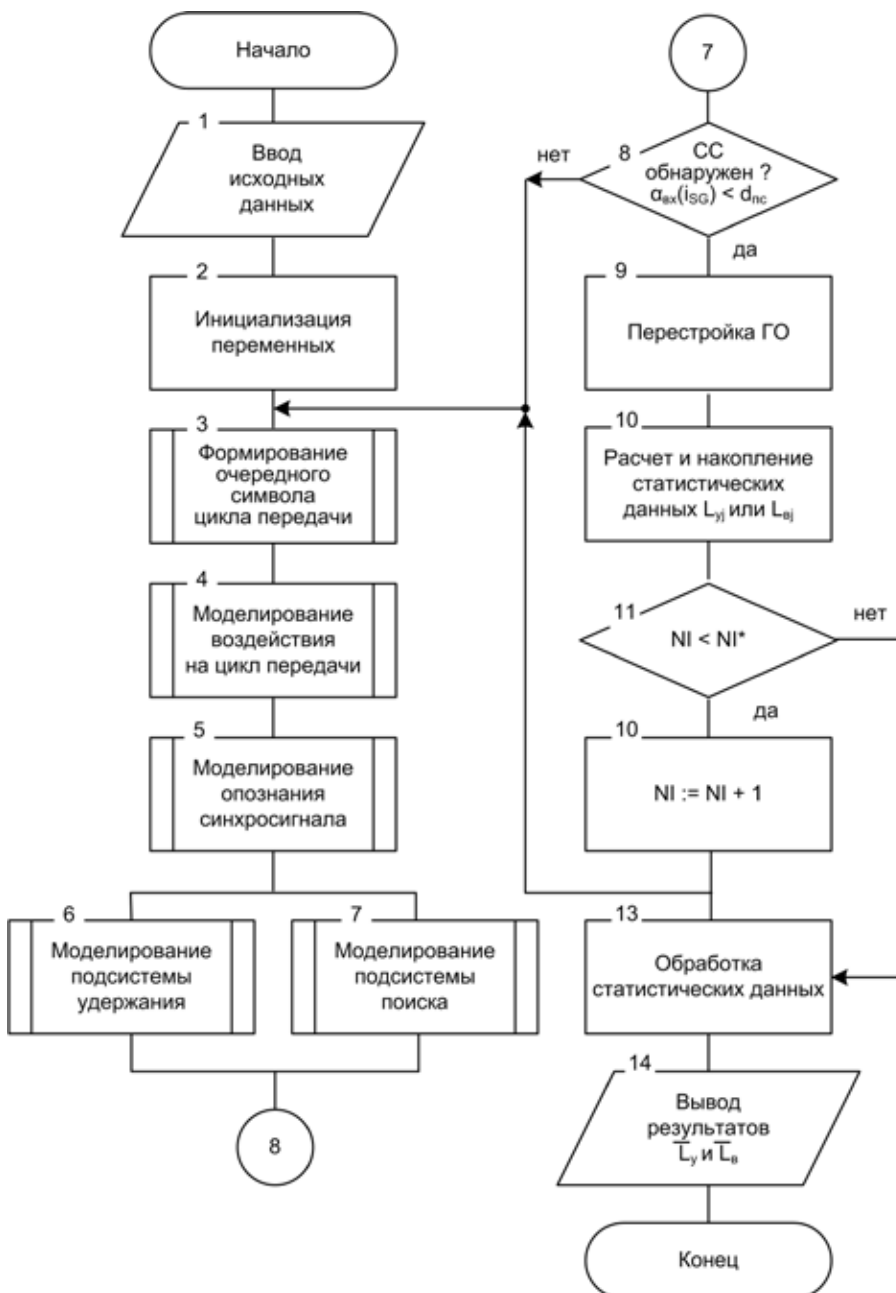


Рис. 1. Блок-схема обобщенного алгоритма имитационной модели исследуемой СЦС

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИКЛА ПЕРЕДАЧИ

В имитационной модели в качестве синхросигнала может выбираться сосредоточенная или рассредоточенная кодовая комбинация двоичных символов с необходимой структурой, с одной или несколькими критическими точками. При этом формирование цикла передачи происходит последовательно, подобно тому, как осуществляется передача символов синхросигнала и остальных информационных и служебных символов группового цифрового сигнала аппаратурой временного объединения. Блок-схема алгоритма формирования цикла передачи представлена на рисунке 2.

Исходными данными при формировании очередного символа цикла передачи является длина синхросигнала m , структура синхросигнала $\{m\}$, местоположение синхросигнала в цикле и длина цикла передачи N . Выходным параметром процедуры является массив $S(i)$, имитирующий цикл передачи, в котором m символов являются синхрогруппой, а остальные символы $N - m$ информационными и служебными символами группового сигнала. Процедура формирования очередного символа цикла передачи состоит в следующем. Производится ввод исходных данных (блок 1), инициализация переменных (блок 2). При этом задается одномерный массив структуры синхросигнала $SG(i)$ (где i – длина массива, $i = \overline{1, m}$), в котором каждому элементу присваивается определенный двоичный символ «1» или «0» (в зависимости от вводимой структуры синхросигнала $\{m\}$). Кроме того, задается массив $Q(i)$, значениями

элементов которого являются упорядоченные по возрастанию целые положительные числа от 1 до N , означающие номера тактовых интервалов цикла, на которых должны размещаться соответствующие символы синхросигнала. Блоки 3 и 4 обеспечивают подсчет числа моделируемых тактовых интервалов TI и контроль окончания цикла передачи. При моделировании следующего цикла передачи в блоке 5 производится

установка начального значения номера тактового интервала. В блоке 6 осуществляется проверка соответствия номера тактового интервала NTI элементам цикла, предназначенным для передачи очередного символа синхросигнала. Если номер тактового интервала соответствует элементам цикла, предназначенным для передачи синхросигнала ($NTI \leq m$), то NTI присваивается двоичный символ i -го элемента массива $SG(i)$ (блок 7). В противном случае (при $NTI > m$), происходит формирование остальных информационных и служебных символов $S(i)$ (блоки 11-14). В блоках 8, 9 осуществляется увеличение переменной i после очередного считывания значения двоичного символа из массива $SG(i)$ и проверка условия окончания формирования синхросигнала. Если значение переменной i стало больше числа элементов массива $SG(i)$, то переменной (i) присваивается значение «1» (блок 10), что соответствует ситуации, когда в текущем цикле передачи всем позициям, определенным для целей синхронизации по циклам, уже присвоены значения из массива $SG(i)$. Затем с помощью блока 6 иницируется работа блока 11, т. е. осуществляется формирование информационных и служебных символов цикла передачи.

Формирование последовательности информационных и служебных символов $S(i)$ в цикле передачи осуществляется с помощью стандартного генератора псевдослучайных чисел с равномерным распределением в интервале $(0, 1)$, генерирующем псевдослучайные числа ξ . Если псевдослучайное число меньше 0,5, то очередной символ цикла передачи $S(i) = 0$, в противном случае — $S(i) = 1$. С помощью блока 15 осуществляется моделирование проскальзывания. При этом проскальзывание имитируется методом принудительного начала цикла передачи в момент внесения проскальзывания. В блоке 16 осуществляется вывод результатов $S(i)$ и выход из процедуры.

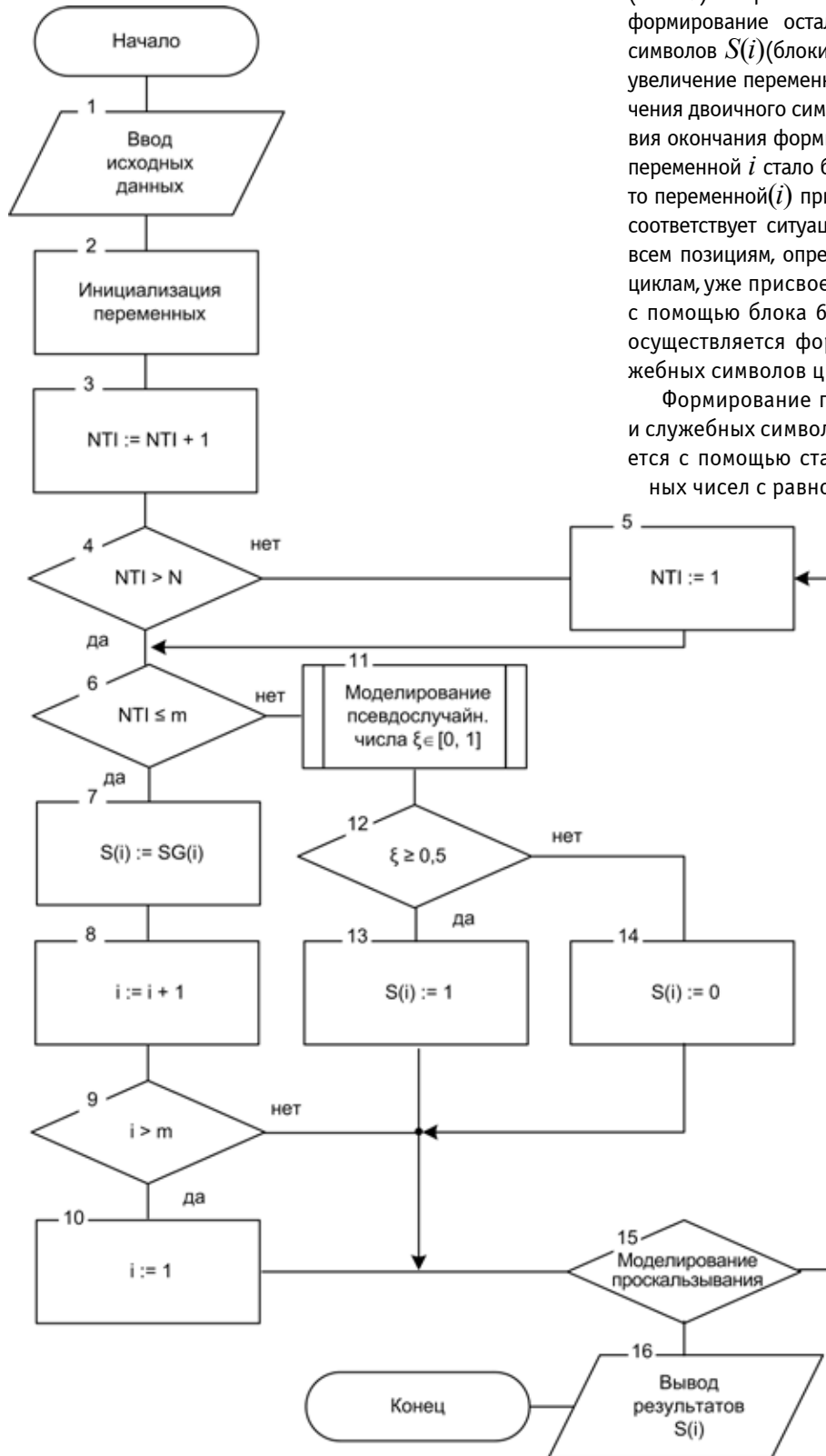


Рис. 2. Блок-схема алгоритма формирования цикла передачи

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ НА ЦИКЛ ПЕРЕДАЧИ

Построение имитационной модели цифрового линейного тракта позволяет провести необходимые модельные эксперименты для оценки характеристик исследуемой СЦС.

Исследованию влияния на цикл передачи группового цифрового сигнала различных факторов посвящены работы [2, 5] и др. В большинстве случаев в качестве воздействующих факторов рассматривают помехи, вызывающие искажения символов (ошибки) цикла передачи или его перерывы.

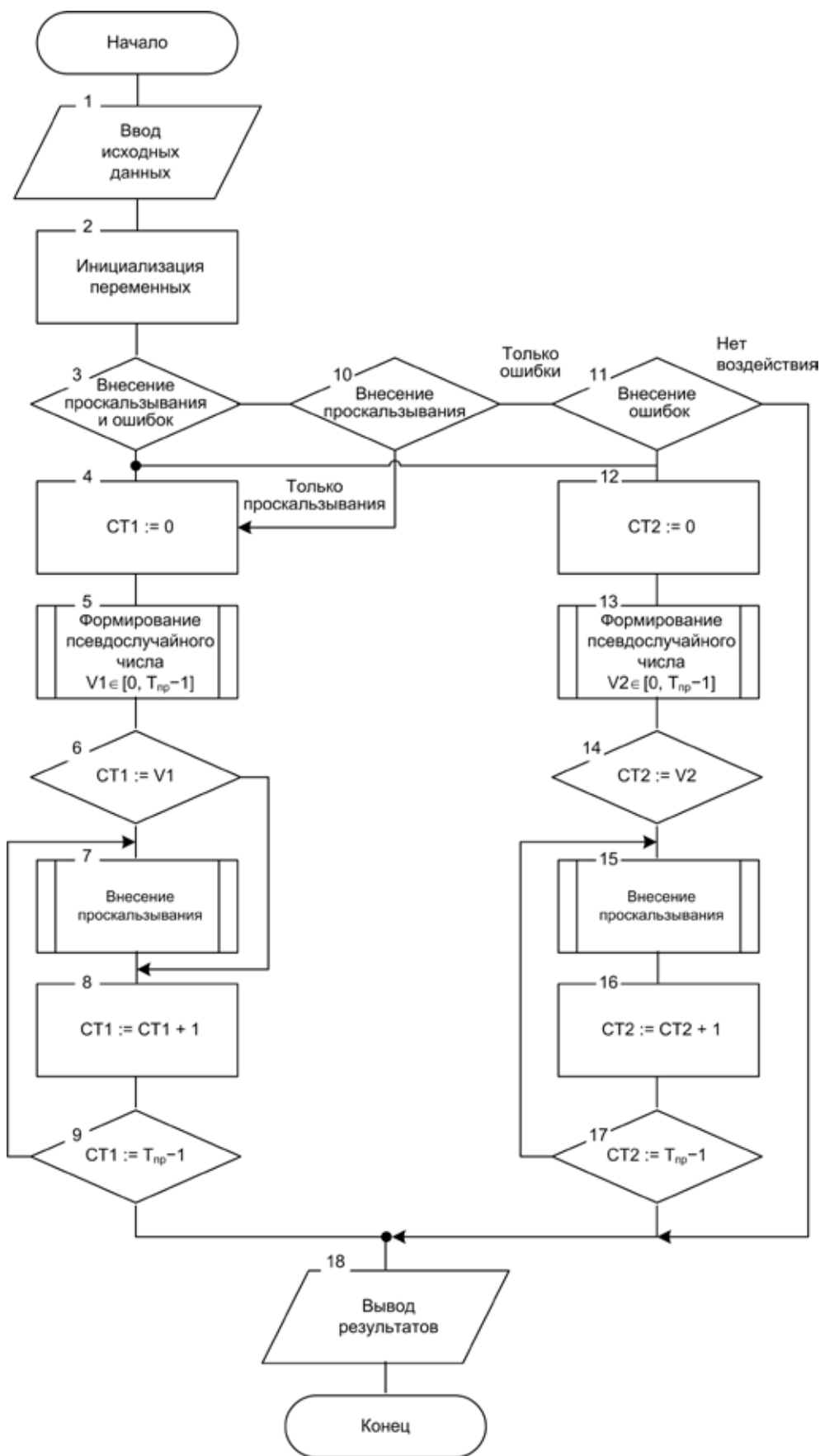


Рис. 3. Блок-схема алгоритма воздействия помех на цикл передачи

Необходимо отметить, что при оценке помехоустойчивости СЦС с параллельным поиском в модели линейного тракта важно имитировать влияние помех, вызывающих ложные сбои синхронизма, а при оценке быстродействия системы, кроме того, важна имитация влияния проскальзываний, вызывающих истинные сбои синхронизма.

Известные имитационные модели цифрового линейного тракта позволяют моделировать одиночные виды ошибок и проскальзывания, что дает возможность исследовать СЦС методом статистических испытаний [3]. Однако известно, что для некоторых цифровых линейных трактов характерно группирование ошибок [6]. Поэтому известные модели неадекватно отражают статистику ошибок в реальном тракте, так как не имитируют пакетирование ошибок.

Имитационная модель источника ошибок должна, с одной стороны, удовлетворять требованиям точного воспроизведения процесса воздействия помех с учетом многочисленных факторов, с другой – быть простой и удобной для реализации на ЭВМ. Указанные требования противоречивы. Для разрешения противоречия использована модель независимых ошибок, которая характеризуется вероятностью ошибки одиночного символа $P_{ош}$. Известно также, что в реальных цифровых каналах распределение ошибок в пакетах близко к независимому. Ранее проводимые исследования [3] подтвердили, что существенное ухудшение быстродействия и помехоустойчивости СЦС с параллельным поиском характерно при больших значениях $P_{ош} \geq 10^{-3}$, когда распределение ошибок в пакетах и самих пакетов наиболее близко к равномерному.

Учитывая сказанное, в качестве модели ошибок при имитационном моделировании цифрового линейного тракта используется стандартный датчик псевдослучайных чисел с равномерным распределением в интервале $[0, T_{ou} - I]$. Аналогичный датчик с интервалом $[I, n_{ou\ max}]$ может быть использован для моделирования группирования ошибок. При этом в момент внесения ошибки в зависимости от максимальной величины пакета ошибок $n_{ou\ max}$ в групповой сигнал вводится одиночная ошибка или пачка ошибок. При этом ошибки в пачке могут быть как сплошные, так и иметь заданную вероятность ошибки $P_{ou\ n}$.

Проскальзывания группового цифрового сигнала имитируются нарушением периодичности формирования циклов передачи. Если при этом распределение ошибок в групповом цифровом сигнале будет равномерным, то и распределение проскальзываний будет таким же. Поэтому в качестве модели возникновения проскальзываний при имитационном моделировании СЦС выбран стандартный датчик псевдослучайных чисел с равномерным распределением в интервале $[0, T_{np} - I]$.

Для оценки помехоустойчивости и быстродействия моделируемой СЦС применяются два типа моделей воздействия на цикл передачи: модель воздействия помех, вызывающих ошибки, и модель воздействия помех, вызывающая и ошибки, и проскальзывания. Выбор той или иной модели воздействия осуществляется в зависимости от исследуемой характеристики СЦС: для среднего времени \bar{L}_y удержания синхронизма – модель ошибок, а для среднего времени \bar{L}_e восстановления синхронизма – модель ошибок и проскальзываний.

Блок-схема алгоритма воздействия на цикл передачи приведена на рисунке 3. Исходными данными процедуры воздействия на цикл передачи являются: очередной символ цикла, выбранный режим воздействия, квазипериод следования ошибок $T_{ou} = I/P_{ou}$, квазипериод следования проскальзывания $T_{np} = I/P_{np}$, максимальная длина пачки ошибок $n_{ou\ max}$, длина цикла передачи N , длина синхрогруппы m . Выходными данными является текущий символ цикла.

Процедура воздействия на цикл передачи имитируется следующим образом. Вначале производится ввод исходных данных (блок 1), инициализация переменных (блок 2). В блоках 3, 10, 11 реализуется модель воздействия: внесение ошибок (одиночных или пакетированных) и проскальзывания одновременно, только проскальзывания, только ошибок и отсутствие воздействия. При этом все воспроизводимые в процессе моделирования тактовые интервалы разбиваются на одинаковые квазипериоды. Для модели проскальзываний величина квазипериода составляет T_{np} , для модели ошибок – T_{ou} . В блоках 4 и 12 осуществляется установка начального состояния счетчиков тактовых интервалов $CT1$ и $CT2$. Блоки 5 и 13 представляют собой процедуры формирования псевдослучайных чисел $V1$ и $V2$ с равномерным законом распределения на интервалах $[0, T_{np} - I]$ и $[0, T_{ou} - I]$ соответственно. Числа $V1$ и $V2$ соответствуют моментам внесения проскальзывания и ошибок. Затем в блоках 6 и 14 проверяется достижение счетчиками $CT1$ и $CT2$ значений $V1$ и $V2$. При достижении данных значений производится вызов процедур внесения проскальзывания,

моделирования случайной величины длины пачки ошибок и внесения ошибок в зависимости от выбранных условий в блоках 3, 10 и 11. Ошибка моделируется инверсией одного текущего символа цикла передачи (блок 15), а проскальзывание – началом формирования нового цикла передачи (блок 7), т. е. нарушением периодичности его следования. Далее в блоках 8 и 16 счетчиками $CT1$ и $CT2$ производится увеличение переменной счета на единицу, а в блоках 9 и 17 – проверка достижения границы заданного интервала T_{np} и T_{ou} . В конце процедуры осуществляется вывод текущего символа цикла передачи (блок 18) и выход из процедуры.

4 ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЦИКЛОВОЙ синхронизации с параллельным поиском

Разработанная имитационная модель с учетом динамики взаимодействия ее составных частей, влияния конкретной структуры синхросигнала при воздействии на систему дестабилизирующих факторов позволяет найти функциональные показатели СЦС: быстродействие и помехоустойчивость.

Блок-схема алгоритма имитационного моделирования представлена на рисунке 4. Здесь блок 1 обеспечивает ввод исходных данных, а блок 2 – инициализацию переменных. В блоке 3 производится формирование цикла передачи группового сигнала. При этом формируемые символы синхросигнала определяются структурой синхрогруппы, а остальные символы цикла формируются с помощью датчика псевдослучайных чисел.

В зависимости от исследуемой характеристики СЦС используется соответствующая модель воздействия. Блок 4 обеспечивает ввод в многоканальный сигнал либо одиночных ошибок, либо пачек ошибок, либо проскальзываний. При исследовании помехоустойчивости имитируется искажение символов цикла, зависящее от заданного квазипериода следования ошибок T_{ou} , или же искажение группы символов, зависящее от максимальной величины пакета ошибок $n_{ou\ max}$. Ошибки в пачке могут быть как «сплошными», так и иметь заданную вероятность $P_{ou\ n}$. При исследовании быстродействия, кроме того, имитируется появление проскальзываний, задаваемое параметром T_{np} . Если произошло воздействие на символы цикла (блок 5), то в блоке 6 запускается процедура измерения времени восстановления циклового синхронизма L_e (оценивается от момента внесения проскальзывания до момента восстановления циклового синхронизма) или времени удержания циклового синхронизма L_y (оценивается от момента восстановления циклового синхронизма до момента его потери). Двоичные символы группового цифрового сигнала после воздействия на них в блоке 4 поступают в блоки 7–11, в которых имитируется функционирование опознавателя синхросигнала. При этом в блоке 7 производится посимвольное сравнение принятой кодовой комбинации (КК) с кодом синхрогруппы (СГ). В имитационной модели имеется возможность обнаружения m_{ou} и коррекции k_{don} ошибок в синхросигнале (где m_{ou} – число ошибок в синхросигнале, k_{don} – допустимое число корректируемых символов в синхросигнале). Отклик на выходе опознавателя формируется в виде коэффициента ω , величина которого изменяется в зависимости от количества правильно распознанных синхросимволов и весового коэффициента q .

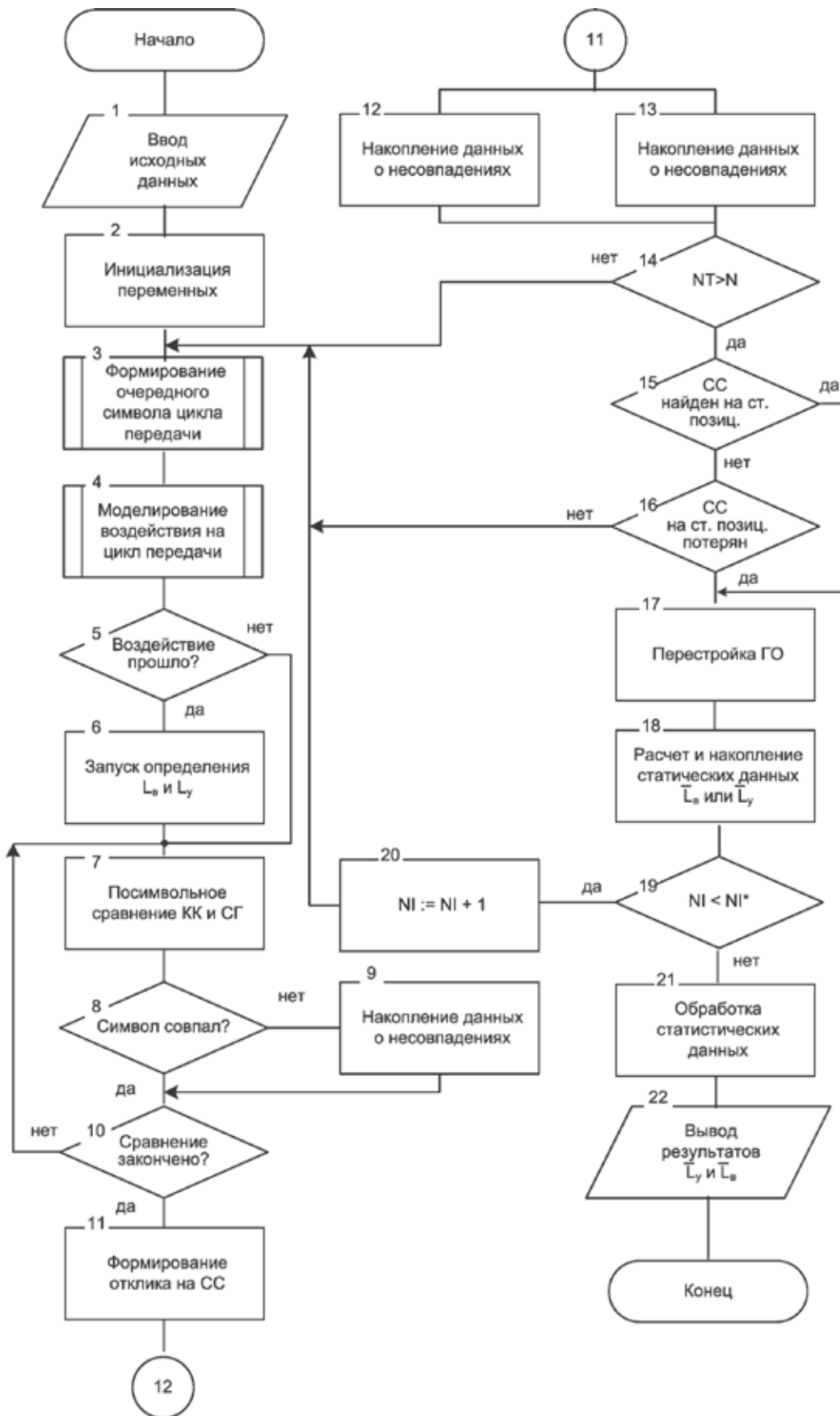


Рис. 4. Блок-схема алгоритма имитационной модели СЦС с параллельным поиском

В предлагаемой СЦС все кодовые комбинации цикла передачи анализируются на соответствие структуре синхросигнала. При появлении на какой-либо позиции цикла кодовой комбинации, соответствующей структуре синхросигнала, производится суммирование откликов в накопителе, соответствующем контролируемой позиции цикла (в блоке 12). Сумма накопленных откликов с опознавателя синхросигнала на кодовую комбинацию с i -м номером тактового интервала цикла отражается значением i -го элемента массива α_{ex} . Так как контролируется накопление на всех тактовых интервалах цикла, то длина массива α_{ex} устанавливается равной N . Тогда индекс i его элементов будет соответствовать номеру контролируемого тактового интервала, а значение самих элементов – текущей величине накопленной суммы откликов в накопителе. В блоке 13 осуществляется накопление откликов опознавателя синхросигнала на текущей позиции цикла и подсчет порога потери синхронизма d_{nc} . В конце каждого цикла анализа (контроль окончания цикла проводится в блоке 14) выполняется процедура проверки превышения величины накопления откликов опознавателя синхросигнала на какой-либо позиции цикла над всеми другими на величину d_{oc} . Если это событие в подсистеме поиска произошло, то проверяется, на старой или новой позиции найден цикловой синхросигнал. Если на старой – моделируется перестройка генераторного оборудования (блок 17). Если цикловой синхросигнал найден на новой позиции цикла, то осуществляется процедура проверки потери циклового синхронизма (блок 16), и в случае подтверждения его потери – моделируется пере-

стройка генераторного оборудования. Проверка потери синхронизма проводится сравнением величины накопления откликов опознавателя синхросигнала на старой позиции синхронизма с порогом потери синхронизма. Если величина накопления меньше порога, то подсистема удержания определяет состояние потери синхронизма.

Момент перестройки генераторного оборудования соответствует окончанию отсчета количества тактовых интервалов, необходимых для восстановления состояния синхронизма СЦС после истинного или удержания синхронного состояния при ложном сбое системы (блок 18). В этом же блоке имитационной модели проводится расчет и накопление значений времен восстановления L_{ej} и удержания L_{yj} . В блоках 19, 20 обеспечивается подсчет числа проведенных испытаний в одном эксперименте и контроль окончания моделирования при достижении переменной NI заданного в исходных данных значения NI^* . Определение средних значений времени восстановления \bar{L}_e и удержания \bar{L}_y синхронизма производится в блоке 21 с помощью выражений:

$$\bar{L}_e = \frac{\sum_{j=1}^g L_{ej}}{g}, \tag{1}$$

$$\bar{L}_y = \frac{\sum_{j=1}^q L_{yj}}{g}, \tag{2}$$

где g и q – числа проведенных вычислений каждого из показателей качества в одной реализации. Вывод значений среднего времени удержания \bar{L}_y синхронного состояния моделируемой СЦС или среднего времени восстановления \bar{L}_e состояния ее синхронизма производится блоком 22.

Для построения имитационной модели СЦС использован пакет моделирования динамических систем Simulink системы MATLAB, позволяющий достаточно адекватно смоделировать физические процессы, происходящие при функционировании исследуемой системы [7].

5 Анализ результатов имитационного моделирования системы цикловой синхронизации

Построенная имитационная модель СЦС позволяет оценить основные характеристики быстродействия и помехоустойчивости исследуемой системы в зависимости от изменения внутренних параметров и качества среды передачи цифрового сигнала, определяемого вероятностью ошибочного приема одиночных и групп символов.

Выбор значений исходных данных для имитационного моделирования и диапазона их изменения производится из условий функционирования моделируемого объекта и наиболее близкого соответствия значений. Поэтому с целью определения быстродействия исследуемой СЦС для имитационного моделирования выбирались следующие диапазоны изменения параметров: длина синхросигнала $m = 7 \div 12$, порог обнаружения синхросигнала $d_{oc} = 2 \div 15$, допустимое число искаженных синхроимпульсов $k_{don} = 1 \div 4$, вероятность ошибочного приема одиночного символа $P_{ou} = 10^{-4} \div 10^{-1}$, длина цикла передачи $N = 400 \div 1200$, структура синхросигнала с одной, с $m/2$ и m критическими точками.

Для определения помехоустойчивости СЦС диапазон изменения параметров выбирался такой же, как и при определении ее быстродействия, однако, учитывая длительный характер получения результата, даже для одной реализации эксперимента диапазон изменения вероятности ошибочного приема одиночного символа выбирался следующим: $P_{ou} = 10^{-2} \div 10^{-1}$.

Некоторые результаты моделирования приведены на рисунке 5. Показаны зависимости средних времен восстановления и удержания синхронизма от вероятности ошибок. Здесь же приведены результаты при пакетировании ошибок. Моделирование проводилось при следующих исходных данных: $N = 1200$; $m = 9$; $k_{don} = 2$; $d_{oc} = 4$. Кривая 1 соответствует зависимостям, полученным при аналитическом моделировании (при $n_{ou\ max} = 1$) [1], а кривые 2 и 3 – при имитационном моделировании при отсутствии ($n_{ou\ max} = 1$) и наличии пакетирования ошибок ($n_{ou\ max} = 10$) соответственно.

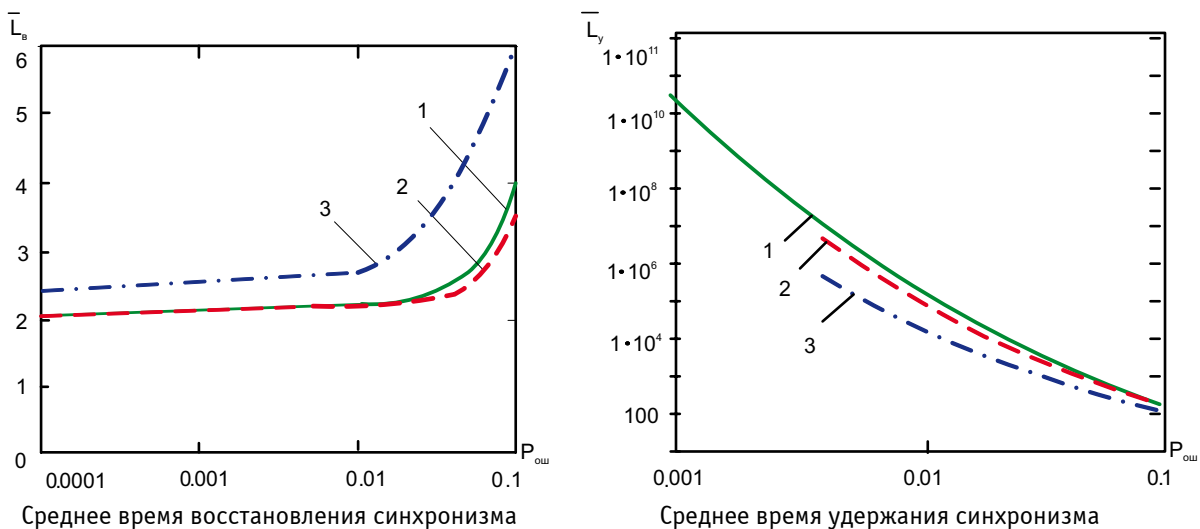


Рис. 5. Результаты имитационного и аналитического моделирования СЦС

Эксперименты показали, что предложенная система [4] по сравнению с известными обеспечивает меньшее среднее время обнаружения циклового синхросигнала. В частности, при приведенных условиях моделирования и вероятности ошибочного обнаружения одиночного символа $P_{ош} = 5 \cdot 10^{-2}$ среднее время обнаружения синхросигнала по сравнению с лучшим известным аналогом [8] уменьшается в 1,5 раза, а при пакетировании ошибок в канале длиной до 10 элементов – в 1,8 раза. При этом время восстановления синхронизма при пакетировании ошибок в канале длиной до 10 элементов и $P_{ош} = 5 \cdot 10^{-2}$ увеличивается по сравнению со временем восстановления при $P_{ош} \rightarrow 0$ в 1,9 раза. Тогда как для аналога это соотношение составляет 3,5 раза.

Необходимо отметить, что применение разработанной имитационной модели ЦС при исследовании процессов восстановления синхронизма особенно целесообразно, если необходимо учесть влияние структуры синхросигнала и его размещение в цикле, а также эффект группирования ошибок. Что же касается исследования процессов удержания синхронного состояния, то применение имитационного моделирования имеет смысл только при больших вероятностях ошибочного приема одиночного символа (больше 10^{-3}), поскольку в противном случае среднее время удержания циклового синхронизма весьма велико и его оценка требует больших временных затрат.

Таким образом, разработанная имитационная модель ЦС с параллельным поиском по сравнению с известными моделями полнее отражает процессы, протекающие при функционировании моделируемой системы, и позволяет получить оценки характеристик быстродействия и помехоустойчивости в условиях нестационарной сложной помеховой обстановки. Проверка соответствия результатов аналитического и имитационного моделирования показала адекватность аналитических моделей. При уровне значимости 0,05 и 300 экспериментах значения t -статистик не превышают критических.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена имитационная модель ЦС с параллельным поиском, позволяющая проводить моделирование с учетом высокой вероятности и пакетирования ошибок, эффекта проскальзывания цифрового сигнала, структуры синхрогрупп и их размещения в цикле, что позволило увеличить ее адекватность реальным системам в ситуации воздействия интенсивных нестационарных помех.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенная ЦС по сравнению с известными обеспечивает лучшее быстродействие и помехоустойчивость.

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что оно отражает процессы, протекающие в ЦС с точностью до погрешности эксперимента. Средние времена восстановления и удержания синхронизма соответствуют результатам, полученным в ходе аналитического моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кальников В. В. Математическое моделирование системы цикловой синхронизации цифровых систем передачи / В. В. Кальников, Ю. И. Береснев, Р. Г. Зиганшин // Автоматизация процессов управления. – 2010. – № 1 (19). – С. 50–58.
2. Паршин В. А. Алгоритм и имитационная модель ЦС для ЦСП специального назначения / В. А. Паршин, А. И. Тимошкин // Совершенствование технических средств связи : тр. всесоюз. науч.-тех. конф. – Л. : НПО «Дальняя связь», 1991. – С. 21–22.
3. Кальников В. В. Имитационная модель систем цикловой синхронизации с параллельным и рециркулярным поиском синхросигнала / В. В. Кальников, А. Г. Ташлинский. – Ульяновск : УФВУС, 2002. – 32 с.
4. Пат. 2348117 Российская Федерация, МПК⁸ Н 04 L 7/08. Устройство для цикловой синхронизации / Егоров Ю. П., Кидалов В. И., Кальников В. В., Панкратов П. А., Ташлинский А. Г.; заявитель и патентообладатель ФНПЦ ОАО «НПО «Марс»; заявл. 28.05.07, опубл. 27.02.09, Бюл. № 6. – 18 с.
5. Кальников В. В. Моделирование воздействия помех на цикл передачи / В. В. Кальников // Системы искусственного интеллекта: алгоритмы обработки и модели : тр. междунар. конф. КЛИН-2002. Т. 3. – Ульяновск : УлГТУ, 2002. – С. 37–38.
6. Минкин В. М. Экспериментальное исследование ошибок в цифровых линейных трактах / В. М. Минкин, Г. Е. Иткис // Труды НИИР. Сер. «Радиорелейная и спутниковая связь». – 1989. – Вып. 1. – С. 65–71.
7. Гуляев А. К. MATLAB 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows : практическое пособие / А. К. Гуляев. – СПб. : КОРОНА принт, 2001. – 400 с.
8. Пат. 2284665 Российская Федерация, МПК⁷ Н 04 L 7/08. Устройство для синхронизации по циклам / Кальников В. В., Бережной С. Л. ; заявитель и патентообладатель ФНПЦ ОАО «НПО «Марс» ; заявл. 12.04.05, опубл. 27.09.06, Бюл. № 27. – 22 с.