

Моделирование функций анализатора кратковременных помех для виртуальных исследований в области ЭМС

Н.В. Лемешко, к.т.н.

Кафедра «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы», МИЭМ

nlem83@mail.ru, м.т. 8-915-231-17-47

Развитие теории виртуальной сертификации РЭС по помехоэмиссии, являющейся базой для потенциального перевода лабораторных испытаний по ЭМС в плоскость моделирования, предполагает решение ряда узловых вопросов, к которым относится и разработка моделей измерительных приемников (ИП) [1 — 3]. Практическое использование моделей ИП позволяет на основе моделирования анализировать отклик измерительных приборов, удовлетворяющих требованиям стандартов [4, 5], на входные сигналы произвольной формы.

Стандарты [4, 5] предусматривают наличие у ИП дополнительных функций, повышающих информативность измерений. Одной из них является анализ кратковременных радиопомех (КРП). В основе функционирования анализатора кратковременных радиопомех (АКРП) лежит сопоставление временных интервалов, характеризующихся наличием либо отсутствием превышения заданного уровня помех, со значениями, установленными в стандартах. На основе такого анализа кратковременные помехи выделяются среди всей их совокупности, и далее выполняется необходимая обработка.

Функции АКРП могут быть реализованы на уровне вторичной обработки результатов моделирования, а не в его цикле. Однако в работах [6, 7] была показана не только возможность обработки результатов моделирования непосредственно в электрических схемах, но и её преимущества в случае сложных взаимосвязей, построенных на основе пороговых преобразований, логических условий и интегральных соотношений. Именно к таким случаям относится анализ кратковременных радиопомех.

Настоящая работа посвящена анализу требований, предъявляемых к функциональности АКРП, и построению схемы, обеспечивающей их реализацию.

Требования стандартов к функциям АКРП

В стандарте [4] отмечается, что АКРП является отдельным каналом обработки сигналов на промежуточной частоте (ПЧ), предназначенным для использования в полосе частот В по СИСПР (от 0,15 до 30 МГц) в измерительных приемниках с квазипиковым детектором (ИП КД). Более поздний стандарт [5] не регламентирует полосы частот использования АКРП, поэтому следует считать, что их применение возможно для любых диапазонов функционирования ИП КД, т.е. от 9 кГц до 1000 МГц.

Основным параметром АКРП является уровень анализа, или опорный уровень ПЧ. Согласно [4], уровень анализа определяется значением синусоидального сигнала,

квазипиковое значение которого равно нормированному уровню. С другой стороны, в [5] указано, что под опорным уровнем ПЧ понимается такой уровень сигнала на промежуточной частоте ИП для синусоидального входного воздействия, при котором показание ИП КД равно норме на непрерывную радиопомеху для данного объекта исследований. Приведенные определения можно считать идентичными, однако для определенности ниже будем использовать определение и терминологию [5]. Погрешность установки опорного уровня ПЧ не должна превышать 3 дБ [4].

В стандарте [5] приводятся следующие признаки кратковременной радиопомехи:

- её квазипиковое значение превышает опорный уровень;
- длительность КРП — не более 200 мс;
- длительность временного интервала, разделяющего КРП, — не менее 200 мс.

Последовательность коротких импульсов должна трактоваться как единая КРП, если её длительность, измеренная от начала первого и до конца последнего импульса не превышает 200 мс. Все временные интервалы определяются по пересечению сигналом на ПЧ порогового уровня. Погрешность измерения временных интервалов не должна превышать $\pm 5\%$.

Из приведенного выше определения следует, что с пороговым уровнем ПЧ следует сопоставлять квазипиковое значение огибающей на ПЧ, которое может быть вычислено на основе анализа работы квазипикового детектора, проведенного в [8].

Согласно [4, 5], АКРП должны:

- 1) подсчитывать количество помех, длительность которых равна или менее 200 мс;
- 2) регистрировать радиопомехи с длительностью более 200 мс;
- 3) регистрировать появление в любом двухсекундном интервале более двух помех;
- 4) фиксировать, что помехи длительностью не более 10 мс имеют частоту повторения не более 5 в минуту;
- 5) фиксировать, что общая продолжительность помех длительностью более 200 мс превысила 600 мс;
- 6) определять частоту появления КРП.

Кроме того, приложение Е [5] регламентирует, что, согласно п.4.2.3 [9], АКРП должны дополнительно:

- 7) подсчитывать количество КРП длительностью не более 10 мс;
- 8) подсчитывать количество КРП длительностью более 10 мс и не более 20 мс;
- 9) подсчитывать количество КРП длительностью более 20 мс и не более 200 мс;
- 10) фиксировать длительность каждой зарегистрированной радиопомехи, превышающей пороговый уровень ПЧ;

11) определять временной интервал от начала испытаний до появления первой радиопомехи;

12) суммарную длительность радиопомех, не являющихся кратковременными.

Из приведенного перечня необходимых функций видно, что обработка результатов моделирования оказывается весьма сложной. Это оправдывает использование предлагаемой ниже макромоделли АКРП.

Реализация функций АКРП при моделировании измерительных приемников

Предлагаемая ниже макро модель, по сути являющаяся предикативно-логической надстройкой [6, 7] с множественными обратными связями, была построена на основе анализа требований к функциональности АКРП. Её схема представлена на рис. 1. Рассмотрим принципы работы структурной схемы модели.

Напряжение, формируемое на выходе фильтра ПЧ ИП, поступает на детектор огибающей, который может быть построен для данной полосы частот по СИСПР на основе методов, подробно изложенных в [8]. Опорному уровню ПЧ S_O , задаваемому в квазипиковых значениях, соответствует амплитудное значение S_A , равное уровню огибающей синусоидального сигнала, при котором достигается норма на непрерывные радиопомехи в конкретном случае. Детектор огибающей формирует сигнал $S_S(t)$, соответствующий мгновенному её уровню на ПЧ.

Значения S_O и S_A связаны через коэффициент детектирования K_C , рассчитываемый для каждого значения ПЧ и полосы частот СИСПР, причем $S_O = K_C S_A$. Значения K_C , найденные из уравнения (13) [8], приведены в таблице 1. Параметры детектора огибающей рассчитываются по значению промежуточной частоты для каждой полосы частот по СИСПР. Значения ПЧ, выбранные для моделей ИП в [1], приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов детектирования квазипикового детектора и промежуточных частот моделей ИП для разных полос частот СИСПР

Параметр	Полоса частот СИСПР		
	A (9...150 кГц)	B (0,15...30 МГц)	C, D (30...1000 МГц)
Значение коэффициента детектирования K_C	0,817	0,971	0,987
Значение ПЧ, кГц	5	100	1000

Напряжение $S_I(t)$ формируется на основе пороговых преобразований в компарирующем узле. При этом

$$S_I(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } S_S(t) \geq S_O / K_C; \\ 0, & \text{если } S_S(t) < S_O / K_C. \end{cases} \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет перейти к абстрактной форме представления информации и строить алгоритм функционирования модели АКРП с использованием представления об идеальной внутренней логике (ИВЛ), в которой логические переменные заменяются на напряжения единичного и нулевого уровня.

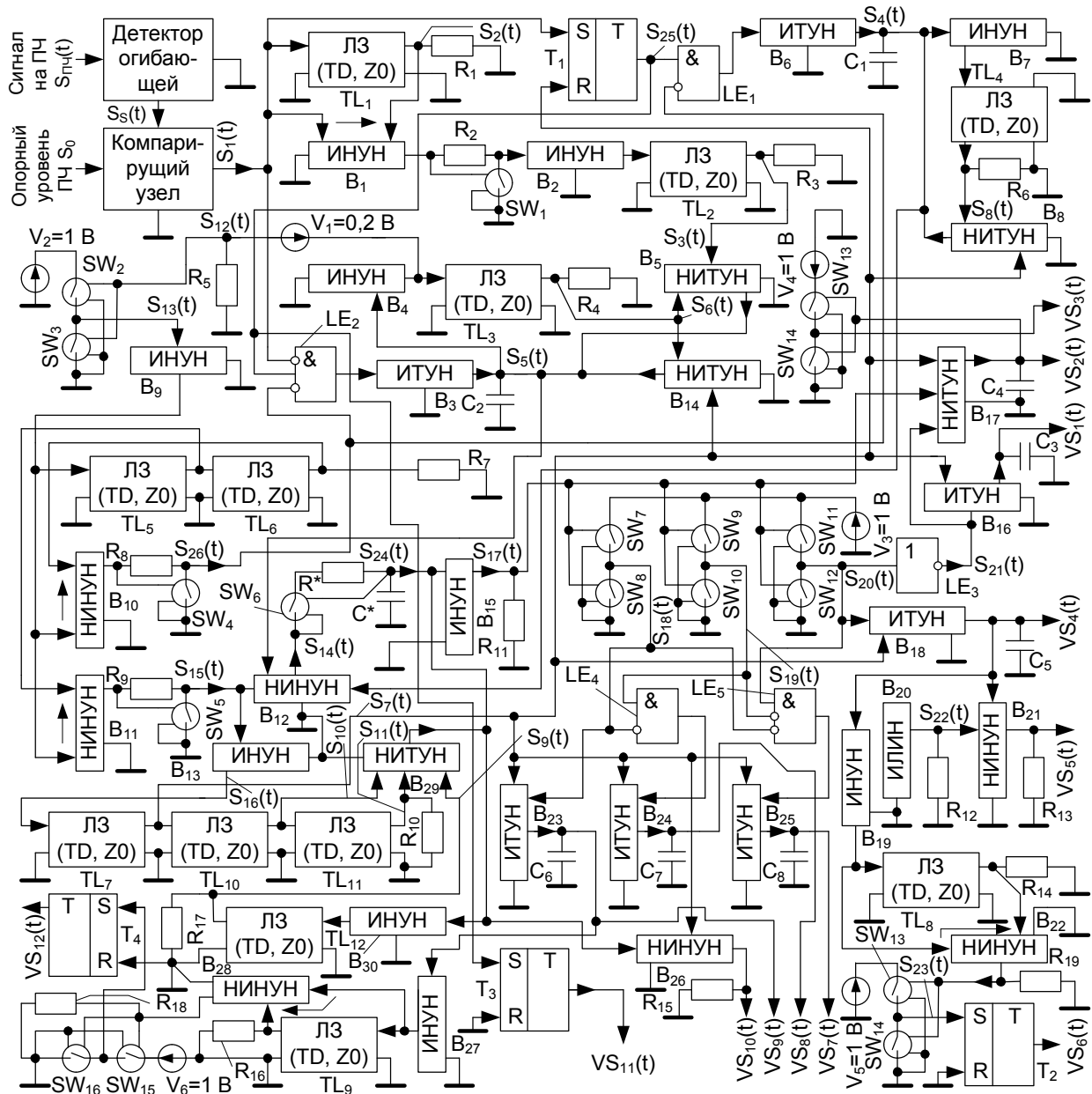


Рис. 1. Структурная схема макромодели АКРП

Для правильной реализации последовательности обработки сигналов в модели АКРП вводится длительность такта T_C — время, отводимое на выполнение единичной операции обработки. Поскольку сама обработка привязана к реализации условий, описываемых [1], то управляющие сигналы должны формироваться непосредственно в схеме без каких-либо внешних синхронизирующих источников.

Сигнал $S_1(t)$, подаваемый в схему с компарирующего узла, поступает на линию задержки без потерь (ЛЗ) TL_1 , нагруженную на согласованное сопротивление R_1 и имеющую

время задержки $TD = T_C$. При этом $S_2(t) = S_1(t - T_C)$. Управляемый напряжением источник напряжения (ИНУН) B_1 формирует разностный сигнал, состоящий из импульсов положительной и отрицательной полярности единичной амплитуды с длительностью T_C . Цепь, состоящая из резистора R_2 и управляемого ключа SW_1 , устраняет отрицательные импульсы. Далее указанный сигнал поступает на ЛЗ TL_2 через развязывающий ИНУН B_2 , и формируется напряжение $S_3(t)$, управляющее принудительным разрядом емкости C_2 , обеспечивающей отсчет времени отсутствия помехи.

В начальный момент времени все триггеры в схеме сброшены, на их выходах установлено нулевое напряжение. При этом логическим элементом LE2 блокируется отсчет длительности отсутствия помехи. Когда последняя появляется, на выходе триггера T_1 устанавливается единичный уровень, снимающий запрет на отсчет времени отсутствия помехи. Отсчет общей длительности помехи выполняется интегрированием тока емкостью C_1 , формируемого управляемым напряжением источником тока (ИТУН) B_6 . Таким образом, напряжение $S_4(t)$ численно равно длительности помехи, обрабатываемой в текущий момент времени.

Аналогичным образом отсчитывается время отсутствия помехи при помощи ИТУН B_3 и емкости C_2 . Емкости C_1 и C_2 в схеме, равно как и все остальные, имеют единичный номинал. Сигнал $S_3(t)$ вызывает принудительный разряд до нулевого напряжения емкости C_2 при каждом переходе $S_1(t)$ к единичному значению, после которого интегрирование на C_2 прекращается, и за время T_C линия TL_3 с таким же временем задержки заполняется напряжением с постоянным значением, равным $S_5(t)$ на момент блокировки интегрирования тока. Аналогичную функцию аналоговой ячейки памяти с кратковременным хранением (см. рис. 1) несут цепи $B_7 - TL_4 - R_6$ и $B_{30} - TL_{12} - R_{12}$. Разряд C_2 осуществляется при помощи управляемого напряжением нелинейного источника тока (НИТУН) B_5 . Он формирует ток

$$I_{B_5}(t) = T_C^{-1} S_3(t) S_6(t). \quad (2)$$

Аналогично (2), источники B_7 и B_{30} формируют токовые сигналы для разряда емкостей C_1 и C^* по соответствующим управляющим воздействиям:

$$I_{B_8}(t) = T_C^{-1} S_7(t) S_8(t), \quad I_{B_{29}}(t) = T_C^{-1} S_9(t) (S_{10}(t) + S_{11}(t)). \quad (3)$$

Отметим, что емкость C^* в составе пикового детектора подвергается последовательно двукратному разряду в целях повышения точности анализа временных интервалов в модели АКРП. Разряд емкости C_2 по управляющему сигналу $S_7(t)$ выполняется при помощи НИТУН B_{14} с выходным током $I_{B_{14}}(t) = T_C^{-1} S_7(t) S_6(t)$.

Обработка временных интервалов начинается при достижении на емкости C_2 напряжения 0,2 В, соответствующего 200 мс после окончания последней из помех. Напряжение $S_{12}(t)$ сопоставляется с нулевым уровнем при помощи управляемых ключей SW_2 и SW_3 с таким же порогом включения, которые образуют делитель напряжения. Сопротивление этих ключей, также как и остальных в схеме, велико в разомкнутом состоянии (порядка 10^{10} Ом) и мало в замкнутом состоянии (10^{-8} Ом). Когда реализуется проверяемое условие, сигнал $S_{13}(t) = 1$ В. Это напряжение через разделительный ИНУН B_9 поступает на последовательно соединенные ЛЗ TL_5 и TL_6 , последняя из которых нагружена на согласованное сопротивление R_7 . Они служат для выработки управляющих сигналов обработки временных интервалов.

Функционирование цепей $B_{10} - R_8 - SW_4$ и $B_{11} - R_9 - SW_5$ аналогично $B_1 - R_2 - SW_1$. Первая из них формирует сигнал в виде прямоугольного импульса длительностью $2T_C$ для блокировки интегрирования токов емкостями C_1 и C_2 в начале цикла обработки. Вторая цепь формирует импульс длительностью T_C , который активирует заряд пикового детектора, построенного на основе цепи $SW_6 - R^* - C^*$. Функция ключа SW_6 , имеющего нулевой порог отпирания, состоит в предотвращении разряда C^* через нелинейный источник напряжения, управляемый напряжением (НИНУН) B_{12} после достижения установившегося уровня напряжения.

На детекторную цепь поступает напряжение, формируемое источником B_{12} , и составляющее $S_{14}(t) = S_{15}(t)(S_4(t) - S_5(t))$. Разность $S_4(t) - S_5(t)$ численно равна длительности обрабатываемой радиопомехи. Сигнал $S_{15}(t)$ представляет собой короткий прямоугольный импульс напряжения с длительностью T_C , за который напряжение на C^* должно выйти на установившийся уровень. Из этого следует, что для детекторной цепи должно выполняться соотношение $R^*C^* \ll T_C$. Результаты моделирования показали, что требуемая точность фиксации длительности помехи достигается при $0,02T_C \leq R^*C^* \leq 0,1T_C$. Использовать значение $0,02T_C > R^*C^*$ не рекомендуется, т.к. это может вызвать существенные погрешности при расчете из-за большого разброса постоянных времени в модели АКРП [10].

Далее сформированный первичный сигнал обработки $S_{15}(t)$ в виде прямоугольного импульса поступает через развязывающий ИНУН B_{13} на цепь, состоящую из последовательно включенных ЛЗ TL_7 , TL_{10} , TL_{11} , последняя из которых нагружена на согласованное сопротивление R_{10} . Две из них обеспечивают задержку, равную T_C , последняя — $2T_C$. Второй управляющий импульс будет сдвинут относительно первого на время T_C , т.е. $S_7(t) = S_{15}(t - T_C)$. Он обеспечивает описываемую ниже обработку зафиксированной косвенным образом длительности помехи. Сигналы $S_{10}(t)$ и $S_{11}(t)$ используются для

двухэтапного разряда C^* в соответствии с (3). При этом $S_{11}(t) = S_{10}(t - 2T_C)$, поскольку после первого разряда для установления постоянного напряжения на всем протяжении линии TL_{12} необходимо время $2T_C$.

Распределение КРП по длительностям (пп. 7, 8, 9 в приведенном выше перечислении) анализируется при помощи делителей напряжения, образованных парами управляемых напряжением $S_{17}(t)$ ключей $SW_7, SW_8; SW_9, SW_{10}; SW_{11}, SW_{12}$. Напряжения на выходе данных делителей равно 1 В в случае, если $S_{17}(t)$ менее 0,01, 0,02 и 0,2 В соответственно. Однозначность распределения КРП по длительности обеспечивается при помощи логических элементов $LE4$ и $LE5$, при помощи которых сигнал, соответствующий меньшему значению времени, блокирует один или два других. Логические элементы строятся на основе представления об ИВЛ [11, 12].

Если помеха не является кратковременной, то сигналы $S_{18}(t), S_{19}(t), S_{20}(t)$ будут равны нулю, а сигнал $S_{21}(t)$ — единице. ИТУН B_{16} предназначен для формирования токового сигнала счета количества помех, не являющихся кратковременными, которому численно равно значение напряжения $VS_1(t)$ на емкости C_3 . Ток источника B_{16} составляет $I_{B_{16}}(t) = T_C^{-1} S_7(t) S_{21}(t)$. После прихода сигнала обработки $S_7(t)$ напряжение на емкости C_3 за время T_C линейно увеличивается на 1 В относительно предыдущего значения. Аналогичным образом осуществляется подсчет количества КРП с длительностями менее 10 мс, от 10 до 20 мс и от 20 до 200 мс при помощи цепей $B_{23} — C_6; B_{24} — C_7; B_{25} — C_8$ с формированием сигналов $VS_9(t), VS_8(t), VS_7(t)$ соответственно, а также общего количества КРП при помощи цепи $B_{18} — C_5$, формирующей сигнал $VS_1(t)$.

Подсчет общей длительности помех, не являющихся кратковременными, выполняется при помощи емкости C_4 и ИТУН B_{17} , формирующего ток $I_{B_{17}}(t) = T_C^{-1} S_{21}(t) S_7(t) S_{17}(t)$. Напряжение $VS_2(t)$ на емкости C_4 численно равно указанному параметру. При помощи пары ключей SW_{13} и SW_{14} формируется сигнал $VS_3(t)$, который при достижении $VS_2(t)$ значения 0,6 В (соответствует 600 мс), становится равным 1 В.

Частота появления КРП рассчитывается следующим образом. Источник линейно изменяющегося напряжения (ИЛИН) B_{20} формирует сигнал $S_{22}(t)$, нарастающий от значения, близкого к нулевому, до конечного времени симуляции и фактически заменяющий время при расчете частоты. Нелинейный управляемый напряжением источник напряжения (НИНУН) B_{21} генерирует напряжение $VS_5(t)$, численно равное отношению $VS_4(t)$ к $S_{22}(t)$, т.е. частоте появления КРП.

ИНУН B_{19} является разделительным. Цепь $TL_8 — R_{14} — B_{22}$ предназначена для выполнения функции, аналогичной формированию первичного импульса обработки, однако ЛЗ TL_8 имеет задержку 2 с. При счете напряжение $VS_4(t)$, соответствующее количеству КРП,

изменяется строго на 1 В, поэтому ключи SW_{13} и SW_{14} должны иметь порог переключения, больший 2 и меньший 3 В. Формируемый ими как образующими делитель напряжения источника V_5 сигнал $S_{25}(t)$ подается на триггер T_2 , который фиксирует событие появление более двух помех в двухсекундном интервале и выдает выходной сигнал $VS_6(t)$. Аналогично функционирует цепь $TL_9 - R_{16} - B_{28}$, дополненная делителем на управляемых ключах SW_{15} и SW_{16} с пороговым напряжением от 5 до 6 В и триггером T_4 , формирующая выходной сигнал $VS_{12}(t)$, фиксирующий, что количество помех с длительностью не более 10 мс не превосходит пяти единиц в минуту.

В таблице 2 приведены наименования выходных сигналов для схемы на рис. 1.

Таблица 2. Выходные сигналы макромодели АКРП на рис. 1

Обозначение	Выходные сигналы макромодели АКРП
$VS_1(t)$	Количество радиопомех, не являющихся кратковременными
$VS_2(t)$	Общая длительность помех, не являющихся кратковременными
$VS_3(t)$	Превышение общей длительностью помех, не являющихся кратковременными, значения 600 мс.
$VS_4(t)$	Количество КРП
$VS_5(t)$	Частота появления КРП
$VS_6(t)$	Появление в любом двухсекундном интервале более двух КРП
$VS_7(t)$	Количество КРП с длительностью от 20 до 200 мс
$VS_8(t)$	Количество КРП с длительностью от 10 до 20 мс
$VS_9(t)$	Количество КРП с длительностью менее 10 мс
$VS_{10}(t)$	Длительность каждой радиопомехи ¹
$VS_{11}(t)$	Время до появления первой помехи ²
$VS_{12}(t)$	Появление в течение минуты более пяти КРП с длительностью до 10 мс
¹ Выводится импульсом длительностью T_C с амплитудой, равной продолжительности радиопомехи. ² Выводится в виде функции включения с единичным перепадом в момент появления первой радиопомехи.	

Вывод длительности каждой обрабатываемой помехи осуществляется импульсно при помощи НУНУН B_{26} , напряжение $VS_{10}(t)$ на входе которого равняется в произвольный момент времени произведению напряжения на пиковом детекторе $S_{24}(t)$ и сигнала обработки $S_7(t)$. Время до прихода первой помехи определяется по сигналу, формируемому триггером T_3 . В момент появления помехи напряжение $VS_{11}(t)$ становится равным 1 В и остается неизменным до конца моделирования.

После окончания цикла обработки и до момента следующего превышения установленного для компарирующего узла порогового уровня отсчет временных интервалов при помощи интегрирования токов емкостями C_1 и C_2 блокируется сигналом $S_{25}(t)$ на выходе триггера T_1 . После наступления условия начала обработки временных интервалов напряжение на указанных емкостях фиксируется блокирующим импульсом $S_{26}(t)$ с длительностью $2T_C$.

Все сопротивления, не упомянутые в предыдущем описании, служат для замыкания контуров протекания токов в схеме. Стрелками показано положительное направление для источников, управляемых разностным напряжением, а также направления распространения сигналов в схеме. Следует отметить также, что однозначная идентификация радиопомехи возможна только через 200 мс после её завершения, поэтому конечное время моделирования с использованием предложенной макромодели должно быть не менее чем на 200 мс больше планируемого.

Из приведенного описания следует, что после наступления события, инициирующего обработку временных интервалов, модель АКРП не обрабатывает входные сигналы в течение времени, равного $2T_C$. Однако время T_C выбирается малым в сравнении с длительностью КРП, поэтому кратковременная блокировка не влияет на качество функционирования модели в целом. Общая длительность цикла обработки составляет $4T_C$.

Заключение

Таким образом, в данной работе предложены схемные модели, реализующие функции АКРП и применимые для определения ФАР. Их разработка завершает теоретическое развитие направления, связанного с моделированием измерительных приемников при виртуальных исследованиях в области ЭМС. Предложенная макромодель АКРП успешно прошла тестирование, предусмотренное стандартами [4, 5].

Литература

1. Лемешко Н.В. Разработка моделей измерительных приемников с детекторами различных типов, используемых при исследованиях в области ЭМС. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2011, №1. — с.89-98.
2. Лемешко Н.В. Особенности и результаты проведения калибровки моделей измерительных приемников с квазипиковым детектором. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2011, №1. — с.99-106.
3. Лемешко Н.В. Виртуальная калибровка моделей измерительных приемников с детекторами пикового, среднего и среднеквадратичного значений. — М.: НИИР, 2011, №2. — с.66-76.
4. ГОСТ Р 51319-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний». — М.: Издательство Стандартов, 2000. — 57 с.
5. ГОСТ Р 51318.16.1.1-2007 «Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и методы измерений. Часть 1-1. Аппаратура для измерения параметров промышленных радиопомех и

помехоустойчивости. Приборы для измерения промышленных радиопомех». — М.: Стандартинформ, 2008. — 58 с.

6. Лемешко Н.В. Предикативно-логические надстройки как средство автоматизации вторичной обработки результатов комплексного моделирования радиоэлектронных средств. — «Новые информационные технологии в автоматизированных системах». Материалы тринадцатого научно-практического семинара. — М.: МИЭМ, 2010. — с.282-290.

7. Лемешко Н.В. Расширение функциональности предикативно-логических надстроек для комплексных моделей радиоэлектронных средств. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2010, №1. — с.85-95.

8. Лемешко Н.В. Моделирование и идентификация параметров моделей детекторов измерительных приемников. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2010, №4. — с.47-62.

9. ГОСТ Р 51318.14.1-2006 «Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от бытовых приборов, электрических инструментов и аналогичных устройств. Нормы и методы испытаний». — М.:Стандартинформ, 2007 — 57 с.

10. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. — Под ред. Алексева О.В. — М.: Высшая школа, 2000. — 478 с.

11. Лемешко Н.В. Моделирование цифровых устройств с использованием IBIS-описания интегральных схем. — М.: МИЭМ, 2006. — 243 с.

12. Лемешко Н.В. IBIS: сущность и перспективы развития. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2009, №1. — с.111-115.