

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ УЗЛОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЕ-КОД

Современные технологии преобразования сигналов в структуре информационно-измерительных и управляющих систем требуют высокой степени точности и эффективности в обработке сигналов. Одним из ключевых элементов таких систем являются преобразователи напряжение-код (ПНК), которые служат для преобразования аналоговых электрических сигналов в цифровую форму. Стремительное развитие цифровых технологий ставит задачи, связанные не только с оптимизацией работы преобразователей напряжение-код, но и проведением оценки их метрологической надежности, а также проведением сравнительного анализа структур ПНК для прогнозирования точностных, динамических и надежностных характеристик каждой из структур [1, 3]. Одной из таких задач является построение моделей узлов ПНК, которые могут обеспечить высокий уровень точности при преобразовании сигналов, а также позволит проводить эффективный анализ и оптимизацию работы устройства [2]. Определение базовых узлов ПНК представляет собой сложную задачу, при этом в настоящий момент отсутствуют универсальные рекомендации по ее решению. В качестве возможных путей предлагаете два принципиально различных подхода к декомпозиции ПНК: структурный и функциональный. При реализации структурного подхода к моделированию, система базируется на описании конкретных элементов и узлов, а функциональный подход предполагает ориентацию базиса на детализацию содержательного описания операторов логических схем алгоритмов, описывающих процессы в данной структуре ПНК. Рассмотрим особенности построения моделей базиса B_1 на основе структурного подхода. Базис B_1 спроектирован таким образом, чтобы любую модель интегральной микросхемы можно было представить либо как единую базисную модель, либо как комбинацию нескольких таких моделей. В простейшей базовой конфигурации базис B_1 содержит 17 моделей: 10 аналоговых и 7 цифровых. К аналоговым моделям относятся: схема вычитания напряжений, усилитель с ограничением амплитуды, инвертирующий и не инвертирующий операционные усилители, ключ, моделирующая аналого-цифровые преобразования с помощью

** Работа выполнена под руководством Курносова Р.Ю. к.т.н., доцента ФГБОУ ВО "ТГТУ"*

релейного элемента, а также упрощённая и полная модели преобразователей кода в ток на взвешенных сопротивлениях, преобразователь кода в напряжение на взвешенных сопротивлениях, преобразователь кода в напряжение на матрице R-2R. Цифровые логические узлы представлены схемами И, ИЛИ, НЕ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ, триггером с отдельными входами (RS-триггер) и триггером со счетным входом. Рассмотрим методику построения моделей различных функциональных назначений на базе B_1 .

При построении точностных моделей базиса B_1 , модель любого аналогового узла в статике может быть описана системой алгебраических уравнений вида (1):

$$\begin{cases} U_1 = F_1(u_1, u_2, \dots, u_m, n_1, n_2, \dots, n_l) \\ U_n = F_n(u_1, u_2, \dots, u_m, n_1, n_2, \dots, n_l) \end{cases} \quad (1)$$

где u_1, u_2, \dots, u_m – входные сигналы; n_1, n_2, \dots, n_l – параметры.

Для цифровых узлов характерно, что при отсутствии существенных повреждений, продолжают корректно функционировать. В качестве примера аналогового узла рассмотрим точностную модель интегральной микросхемы, осуществляющей преобразование кода в ток (ПКТ) на взвешенных сопротивлениях. В базе данных B_1 представлены две модели этой схемы: упрощенная и полная. Различие между ними заключается в количестве параметров, что отражает степень детализации и полноты описания. Данный пример демонстрирует характерную особенность – для любой схемы можно сформулировать описания с различной степенью детализации, что непосредственно влияет на сложность реализации модели.

Математические модели ПКТ в статике имеют следующий вид:

– упрощенная

$$I_{\text{ПКТ}} = \sum_{i=1}^n a_i I_i \quad (2)$$

– полная

$$I_{\text{ПКТ}} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{K_{zi}(a_i U_{z1} + a_i U_{z0}) + e_{0i}}{R_i + R_{\text{пр}i}} + a_i I_{\text{обр}i} \right] \quad (3)$$

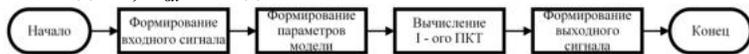
где $I_{\text{ПКТ}}$ – выходной сигнал ПКТ; a_i – разряды входного ПДК, подаваемого на ПКТ и являющийся входным сигналом; n – число разрядов ПКТ; I_i – весовые токи в ПКТ; K_{zi} – коэффициент передачи замкнутого разрядного ключа в разряде ПКТ; e_{0i} – остаточное напряжение на замкнутом разрядном ключе; $I_{\text{обр}i}$ – обратный ток разрядного ключа; $R_{\text{пр}i}$ – прямое сопротивление ключа; R_i – весовые сопротивления в ПКТ; U_{z1} и U_{z0} – эталонные напряжения.

Таким образом в рассмотренных моделях входными сигналами является разряды ПДК, подаваемые на ПКТ, выходными сигналами – $I_{ПКТ}$, а параметрами для упрощенной модели: $n; I_1, I_2, \dots, I_n$; для полной модели: $n; I_1, I_2, \dots, I_n; K_{31}, \dots, K_{3n}; e_{01}, \dots, e_{0n}; I_{обр1}, \dots, I_{обрn}; R_{np1}, \dots, R_{npn}; R_1, \dots, R_n; U_{э1}, U_{э0}$. На рисунке 1а представлена диаграмма алгоритма, описывающего функционирование модели ПКТ в статике. В качестве примера модели цифрового узла рассмотрим модель триггера со счетным входом. Выходные сигналы триггера будут:

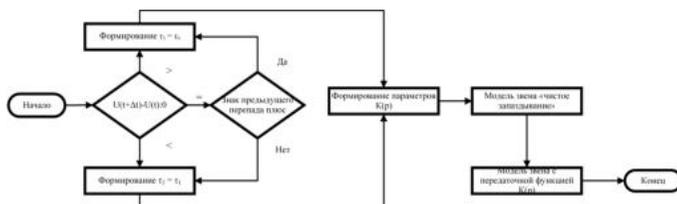
$$\begin{cases} U_{T1}(t+1) = U_{EX}(t)U_{T1}(t) + U_{EX}(t)U_{T1}(t) \\ U_{T0}(t+1) = U_{T1}(t+1) \end{cases}$$

(4)

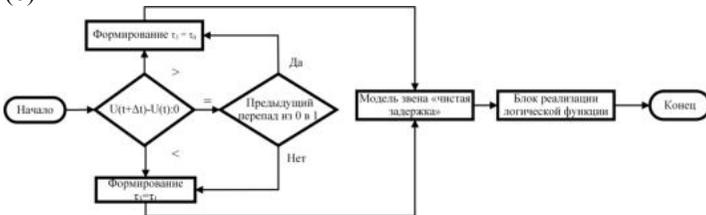
где t – дискретное автоматное время; U_{m1}, U_{m0} – выходные сигналы модели; U_{EX} – входной сигнал.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 1. Модели базиса B_1

а) алгоритм модели ПКТ в статике; б) алгоритм типовой динамической модели аналогового узла; в) алгоритм типовой модели цифрового узла

При построении динамических моделей базиса B_1 в аналоговых узлах, применяемых в ПНК, характерными является наличие задержки между поступлением входного сигнала и формированием выходного сигнала, а также различная реакция на фронты (восходящий и нисходящий) передаваемых импульсов. Учитывая эти особенности, обобщенная структурная схема типовой модели аналогового узла

представлена на рисунке 1б. Динамические характеристики цифровых схем с достаточной точностью могут быть описаны звеном типа «чистая задержка». Алгоритм типовой модели цифрового узла, позволяющий учитывать различия во времени задержки при переходах состояния от 0 к 1 и от 1 к 0, представлен на рисунке 1в. Реализация динамических моделей узлов ПНК на практике сталкивается с определёнными сложностями, во-первых, требуется знание переходных процессов, протекающих в реальных схемах и узлах, а во-вторых, необходима разработка методов аппроксимации и синтеза таких моделей на основе экспериментально полученных переходных характеристик или передаточных функций. Указанные трудности подтверждают обоснованность подхода, согласно которому при сравнительном анализе структур целесообразно исключить динамические модели и заменить их суммой задержек по максимально длинному пути сигнала. Надёжные модели, основанные на деградационных отказах, не имеют существенных различий с точностными по внешним признакам. В качестве примера, для оценки надёжности ПКТ можно использовать уравнения (2) и (3). При этом все параметры в этих моделях являются величинами, зависящими от времени и условий эксплуатации.

Таким образом в статье изложены общие принципы построения моделей узлов ПНК, относящихся к базису B_1 . Рассмотренный принцип построения моделей узлов преобразователя напряжение-код в дальнейшем может быть использован для проведения имитационного моделирования и построения библиотек моделей, в которую будут входить различные модели узлов и элементов, необходимых для построения всех вариантов структур ПНК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курносов, Р. Ю. Метрологический анализ измерительной процедуры цифровых средств измерений / Р. Ю. Курносов, Т. И. Чернышова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 375-382. – DOI 10.17277/vestnik.2023.03.pp.375-382. – EDN DQMTIA.

2. Павлов В.И. Раннее обнаружение начала постепенного изменения свойств случайных процессов / В. И. Павлов, С. В. Артемова, А. Н. Грибков, О.А. Белоусов, М.П. Беляев, И.В. Нагорнова// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 237-246. – EDN YSFQQO.

3. Цветков, Э. И. Метрология. Модели объектов, процедур и средств измерений. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э. И. Цветков. – СПб. : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.

Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ»