

Рис. 4. Обнаружение речевого сигнала

По результатам экспериментов и моделирования рекомендуется устанавливать интервал анализа при обнаружении сигнала 50 с, а после обнаружения – увеличивать до 1 с. В этом случае потери речи при обнаружении незначительны и обеспечивается защита от кратковременных пауз в сигнале.

Практическая реализация накладывает ряд дополнительных ограничений. Во-первых, дециматоры рассчитаны на прием сигналов с одной боковой полосой. Вторая боковая полоса и несущая при их наличии воспринимаются как шум, по мощности пре-

вышающий уровень сигнала в полосе фильтра. Во-вторых, использование целочисленной арифметики при вычислении (1) может привести к переполнению разрядной сетки при длительных интервалах анализа, что требует введения в алгоритм дополнительных способов защиты.

Выводы

Используемый алгоритм позволяет достаточно точно определять значение отношения сигнал/шум, однако при практической реализации точность снижается следующими факторами: децимация сигнала, использование при расчетах целочисленной арифметики, неопределенность параметров приемного тракта, отклонение параметров шума от белого. Для принятия решения рекомендуется использовать дифференциальный показатель, отслеживающий изменения ОСШ на заданном временном интервале. Временные интервалы при обнаружении и приеме рекомендуется выбирать независимо, исходя из свойств сигналов.

Библиографические ссылки

1. Симушин А. А., Богданов А. А. Оценка группового времени задержки в тракте обработки широкополосного сигнала // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 2. – С. 90–92.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 608 с.
3. Прокис Д. Ж. Цифровая связь; пер. с англ. / под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000.

A. A. Simushin, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

D. Yu. Polin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

M. A. Boiarshinov, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Organization of Signal Relaying Using Portable HF-VHF Radio Stations

The paper considers organization of signal relaying and, in particular, development of the detector based on low-power portable HF-VHF radio.

Key words: relaying, portable HF-VHF radio stations, signal detection.

УДК 621.3.015.33

П. А. Ушаков, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

С. А. Широких, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МОДЕЛЬ АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА КАК ЭЛЕМЕНТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Рассмотрены принципы создания модели алюминиевого электролитического конденсатора как элемента с распределенными параметрами (АЭК-ЭРП) и идентификации ее параметров. Проведено сравнение частотных характеристик импеданса предложенной модели с частотными характеристиками образцов АЭК.

Ключевые слова: алюминиевый электролитический конденсатор, элементы с распределенными параметрами, схема замещения, идентификация параметров модели.

Схемотехнические модели электронных компонентов радиоэлектронных устройств широко применяются на практике в современ-

ных системах автоматизированного проектирования. Основными требованиями, предъявляемыми к таким моделям, являются: адекватность, точность, универ-

сальность, возможность настройки модели при изменении типа или параметров моделируемого компонента и т. п.

Электролитические конденсаторы (ЭК) имеют достаточно сложную внутреннюю структуру, их характеристики зависят от большого числа конструктивных и технологических параметров, от используемых материалов, от режимов работы и условий эксплуатации. В то же время наиболее распространенной схмотехнической моделью ЭК, которая используется в большинстве программ схмотехнического проектирования, является простая трех- или четырехэлементная модель на элементах с сосредоточенными параметрами, включающая начальную емкость C , эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС), сопротивление утечки и, в некоторых случаях, индуктивность выводов (ЭПИ). Такая модель не отражает особенности конструкции реального конденсатора, имеет узкий частотный диапазон и невысокую точность (относительное отклонение характеристик модели от экспериментальных данных порядка 5...10 % для емкости и 20...200 % для ЭПС).

Для повышения точности моделей ЭК в последнее время предложены модели, использующие лестничные RC -цепи [1, 2], которые в большей степени учитывают распределенный характер электрохимической системы ЭК и особенности конструкции. В [3] нами предложена модель алюминиевого электролитического конденсатора (АЭК), которая основана на представлении его в виде длинной R_aCYR_k -линии (R_a – сопротивление анодной фольги, C – емкость оксидного слоя, Y – комплексная проводимость между анодной и катодной фольгами, R_k – сопротивление катодной фольги).

В данной работе рассмотрены теоретическое обоснование предложенной модели и методика определения ее параметров. Для анализа был выбран АЭК К50-85-450В-22 мкФ, измеренные частотные характеристики которого представлены на рис. 1.

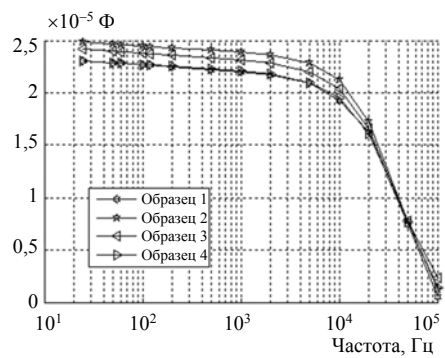
Можно отметить следующие особенности этих характеристик:

- на низких частотах происходит увеличение ЭПС (ESR);
- в диапазоне от 10 Гц до 2 кГц происходит «плавное» падение емкости;
- на участке от 10 кГц до 100 кГц происходит резкое падение емкости.

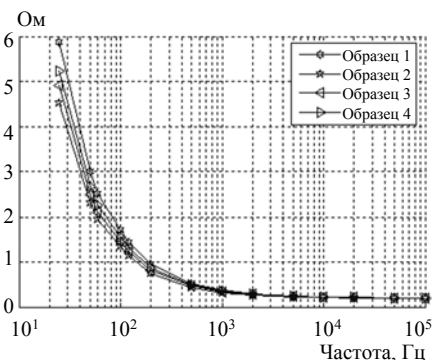
В современных исследованиях [2, 4] увеличение ЭПС на низких частотах связывают с появлением ионного тока в электролите. Это явление можно смоделировать частотной зависимостью объемного сопротивления системы «электролит/разделительная бумага» в АЭК, как показано на рис. 2.

Для анализа модели АЭК-ЭРП воспользуемся упрощенной моделью из [3], представленной на рис. 3.

При идентификации параметров модели разделим параметры на те, которые можно измерить непосредственно в готовом конденсаторе, для которого создаем модель АЭК-ЭРП (или измерить на аналогичных, разрушенных образцах), и те, которые придется определять косвенными методами.



а



б

Рис. 1. Частотные характеристики емкости (а) и ЭПС (б) АЭК К50-85-450В-22 мкФ

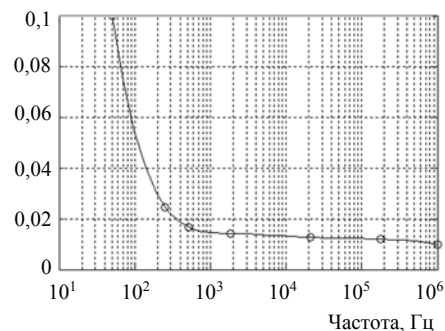


Рис. 2. Частотная характеристика объемного сопротивления системы «электролит/разделительная бумага» АЭК [Ом·м²/м]

Непосредственно были измерены следующие параметры:

- длина фольги – 400 мм;
- ширина фольги – 50 мм;
- толщина фольги – 0,1 мм;
- диаметр электрохимической ячейки – 50 мм;
- количество витков фольги – 25;
- толщина системы «бумага/электролит» – 0,8 мм (вычислено как отношение диаметра электрохимической ячейки к количеству витков катушки);
- коэффициент увеличения поверхности фольг за счет пор – 10;
- сопротивление выводов конденсатора – 0,01 Ом;
- толщина оксидного слоя – $1,0462 \cdot 10^{-6}$ м, определяемая рабочим напряжением АЭК и напряжением формования.

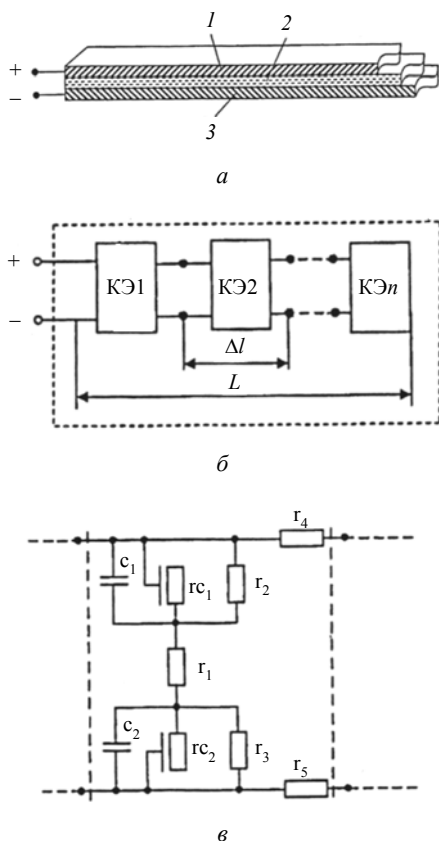


Рис. 3. Модель АЭК-ЭРП: а – в виде R_aCYR_k -линии (1 – анодная фольга, 2 – система «разделительная бумага/электролит», 3 – катодная фольга анода); б – в конечно-элементном представлении; в – схема одного конечного элемента

Выражение для импеданса модели АЭК-ЭРП можно получить, используя неопределенную матрицу проводимостей, полученную в [5] для $R-C-NR$ -линии в виде

$$[Y] = \frac{1}{(1+N)R} \times \begin{bmatrix} \frac{\theta}{th\theta} + N & -\frac{\theta}{sh\theta} - N & \frac{\theta}{sh\theta} - 1 & 1 - \frac{\theta}{th\theta} \\ -\frac{\theta}{sh\theta} - N & \frac{\theta}{th\theta} + N & 1 - \frac{\theta}{th\theta} & \frac{\theta}{sh\theta} - 1 \\ \frac{\theta}{sh\theta} - 1 & 1 - \frac{\theta}{th\theta} & \frac{\theta}{th\theta} + \frac{1}{N} & -\frac{\theta}{sh\theta} - \frac{1}{N} \\ 1 - \frac{\theta}{th\theta} & \frac{\theta}{sh\theta} - 1 & -\frac{\theta}{sh\theta} - \frac{1}{N} & \frac{\theta}{th\theta} + \frac{1}{N} \end{bmatrix}, (1)$$

где $\theta = \sqrt{(1+N)RC}$ – постоянная распространения линии.

Поскольку структура модели АЭК-ЭРП (рис. 1, а) отличается от структуры $R-C-NR$ -линии лишь физическим смыслом слоев, то неопределенную матрицу R_aCYR_k -линии получим, заменив постоянную распространения в (1) выражением

$$\theta = \sqrt{(1+N) \frac{Y_p}{Y_s}}, (2)$$

где Y_p и Y_s – соответственно, поперечная и продольная проводимости линии; N – отношение проводимостей анодной и катодной фольги АЭК.

Принципиально новым в предлагаемой нами модели является описание пор в анодной и катодной фольге АЭК и включение этого описания в состав Y_p . Упрощенное изображение поры показано на рис. 4.

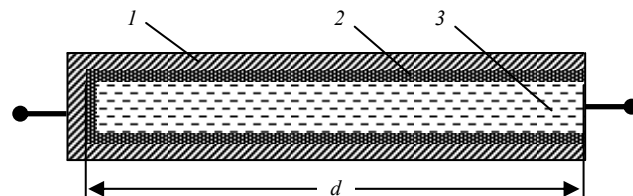


Рис. 4. Упрощенный вид поры в разрезе: 1 – алюминиевая фольга; 2 – оксидный слой; 3 – электролит

Можно заметить, что при таком представлении пору можно смоделировать с помощью длинной RC -линии со структурой слоев вида $R-C-0$ (R – погонное сопротивление столбика электролита в поре, C – погонная емкость окисной пленки фольги, 0 – поперечное сопротивление фольги, близкое к нулю). Для получения выражения импеданса такой линии мы использовали методы, описанные в [6]. Для получения выражений проводимостей Y_p и Y_s введем дополнительные параметры, которые будут определяться по измеренным частотным характеристикам импеданса моделируемого АЭК: концентрация пор анодной фольги, коэффициент увеличения площади поверхности фольги при наличии пор и емкость анодной фольги без пор.

Выражение для импеданса модели Y_m АЭК-ЭРП в данной работе не приводим в связи с его излишней громоздкостью. Для удобства графического представления частотных характеристик импеданса модели будем оперировать более привычными для инженеров параметрами конденсатора – емкостью и ЭПС, которые получим из значений Y_m в виде, соответственно:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot \text{Im}(Y_m)}, (3)$$

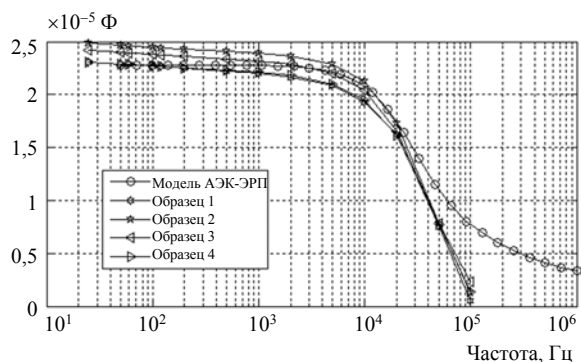
$$ESR = \text{Re}(Y_m), (4)$$

где ω – угловая частота.

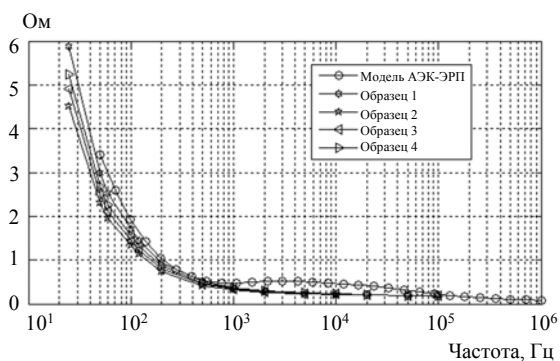
Искомые параметры модели АЭК были найдены путем максимальной подгонки частотных характеристик модели с частотными характеристиками образцов АЭК. Результаты подгонки приведены на рис. 5. Здесь изображены графики частотных зависимостей емкости модели, определенной по формуле (3), и ЭПС (ESR), определенной по формуле (4), в сравнении с аналогичными характеристиками, полученными при измерении импеданса АЭК К50-85-450.

При этом получены следующие параметры модели:

- концентрация пор анода – $10 \cdot 10^{12}$;
- теоретический коэффициент увеличения площади поверхности – 6,87;
- емкость анодной фольги без пор – 1,45 мкФ.



а



б

Рис. 5. Сравнительные частотные характеристики емкости (а) и ЭПС (б) АЭК

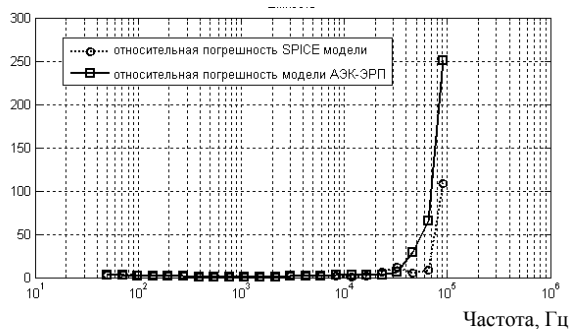
При сравнении частотных характеристик предложенной модели АЭК-ЭРП с аналогичными характеристиками наиболее распространенной лестничной SPICE-моделью [7] выявлено следующее. Относительное отклонение емкости модели АЭК-ЭРП от характеристики измеренного образца не более 10 % в диапазоне частот от 50 Гц до 20 кГц такое же, какое имеет лестничная SPICE-модель. А относительное отклонение ЭПС в том же диапазоне частот не превышает 100 % и в среднем в 2 раза точнее по сравнению с SPICE-моделью (см. рис. 6).

Сравнение измеренных характеристик образца конденсатора и рассчитанных характеристик синтезированной модели АЭК-ЭРП показывает, что предложенная модель имеет более высокую точность. При этом расчет импеданса модели в аналитическом виде не вносит заметного уменьшения скорости вычислений в программах схемотехнического моделирования.

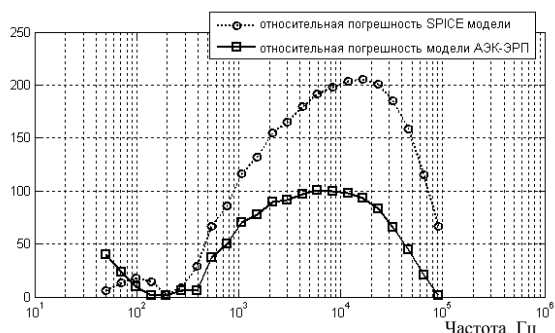
Важным преимуществом предложенной модели является то, что по параметрам модели можно идентифицировать отклонения в технологии изготовления пористой анодной и катодной фольги (например, по изменению параметров, характеризующих модель пор), изменение параметров электролита, как в процессе изготовления конденсатора, так и в процессе его эксплуатации.

Рассмотренный подход в создании модели АЭК можно применить при описании пористых структур танталовых конденсаторов [8], а также ионисторов, с которыми в последнее время связывают прогресс

систем рекуперации энергии на транспорте и системы энергосбережения [9].



а



б

Рис. 6. Относительная погрешность частотных характеристик емкости (а) и ЭПС (б) АЭК-ЭРП и лесничной SPICE-модели

Библиографические ссылки

1. Recent Developments in Fault Detection and Power Loss Estimation of Electrolytic Capacitors / A. Braham [et al.] // IEEE. – 2010. – Vol. 25. – No. 1. – P. 33–43.
2. Kundert K. Modeling Dielectric Absorption in Capacitors // The Designer's Guide Community. – URL: www.designers-guide.org
3. Пат. RU118492U1, 2012. Алюминиевый электролитический конденсатор как элемент с распределенными параметрами / С. А. Широких, П. А. Ушаков.
4. Girginov A., Bojinov M. Conduction Mechanisms In The +Valve Metal/Oxide Film/Electolyte Systems // Journal of the University of Chemical Techology and Metallurgy. – Sofia, Bulgaria, 2008. – P. 29–36.
5. Ушаков П. А. Методы анализа и синтеза многослойных неоднородных RC-элементов с распределенными параметрами и устройств на их основе : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2009. – 35 с.
6. Гильмутдинов А. Х., Ушаков П. А. Расчет электрических и геометрических параметров плёночных распределённых RC-элементов : учеб. пособие. – Казань : Изд-во Казан. авиац. ин-та, 1990. – 80 с.
7. Prymak J. D. SPICE Modeling of Capacitors. – KEMET Electronics Corp., 1995. – 5 p.
8. Prymak J. D. Improvements with Polymer Cathodes in Aluminum and Tantalum Capacitors. – KEMET Electronics Corporation. IEEE APEC Conference 2001. – 9 p.
9. Dzielinski A., Sierociuk D. Ultracapacitor Modelling and Control Using Discrete Fractional Order State-Space Model. – Ročník 13, číslo 1, 2008. – P. 136–145.

P. A. Ushakov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
S. A. Shirokikh, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Model of Aluminum Electrolytic Capacitor as Element with the Distributed Parameters

The paper considers principles of developing the model of aluminum electrolytic capacitor as the element with the distributed parameters (AEC-EDP) and identification of its parameters. Impedance frequency characteristics of the proposed model are compared with frequency characteristics of AEC samples.

Key words: aluminum electrolytic capacitor, elements with distributed parameters, equivalent circuit, model parameters identification.

УДК 519.1(075.8)+510.6(075:8)

С. Ф. Тюрин, доктор технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет
А. М. Морозов, студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет
И. С. Понуровский, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ ПЛИС-FPGA ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДНФ

Предлагается и исследуется логический элемент программируемых логических интегральных схем типа FPGA в составе конфигурируемого логического блока. Традиционно логический элемент реализует логические функции в ДНФ. Однако сложность такой реализации резко увеличивается по мере возрастания числа переменных. Предлагаемый логический элемент снижает затраты на реализацию логических функций.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), логический элемент (ЛЕ), конфигурируемый логический блок (КЛБ), совершенная дизъюнктивная нормальная форма (СДНФ), дизъюнктивная нормальная форма (ДНФ).

В настоящее время так называемые крупнозернистые программируемые логические схемы (ПЛИС) типа FPGA (*field-programmable gate array*) содержат конфигурируемые логические блоки (КЛБ) [1], состоящие из логических элементов ЛЭ, программируемых локальных и глобальных матриц соединений МС – ЛМС, ГМС.

Логический элемент ЛЭ строится как постоянное запоминающее устройство ПЗУ (LUT – Look Up Table), представляющее собой для четырех переменных мультиплексор 16-1 (дерево мультиплексоров), входы данных которого настраиваются так называемыми конфигурируемыми ячейками памяти [1, 2].

Элементарные мультиплексоры 2-1 реализуются так же, как в коммутаторе (коммутатор также является мультиплексором), например, на основе двух цепочек из двух передающих МОП транзисторов [1].

Память конфигурации (настроечная информация логических элементов ЛЭ и матриц соединений МС) – это конфигурационные ячейки КЯ, каждая из которых содержит 6 транзисторов [3] (рис 1).

Модель шеститранзисторной SRAM в одной из систем схемотехнического моделирования представлена на рис. 2.

Таким образом, ПЗУ-LUT реализация ЛЭ ПЛИС-FPGA основана на совершенных дизъюнктивных нормальных формах (СДНФ) представления логических функций, что требует значительных аппаратных затрат. Так, количество транзисторов в ЛЭ без учета коммутаций зависит от 2^n , где n – число переменных, и определяется выражением

$$L_{\text{ЛЕ-СДНФ}} = 7 \cdot 2^n + 2(n+1).$$

В самом дереве мультиплексоров на n переменных необходимо 2^n транзисторов, в ячейках конфигурации (КЯ) $6 \cdot 2^n$ транзисторов, и еще $n + 1$ инвертор, в каждом из которых по 2 транзистора.

В то же время большая часть реализуемых m логических функций n переменных, например, в управляющих автоматах, имеет число конъюнкций k много меньшее, чем общее число наборов n двоичных переменных:

$$k \ll 2^n (2).$$

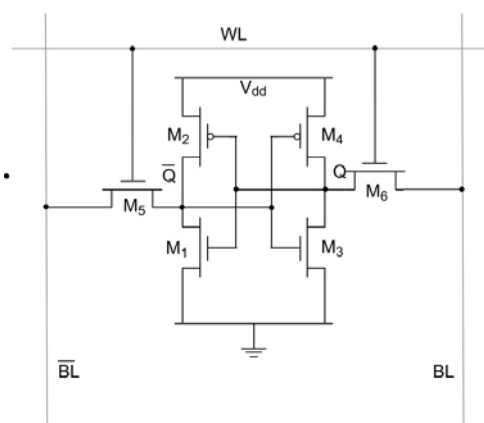


Рис. 1. Шеститранзисторная ячейка статической двоичной памяти (бит) SRAM

Логический элемент ПЛИС-FPGA на основе ДНФ-реализации логических функций с использованием передающих транзисторов

В [4] предложена ДНФ-реализация логики на основе аппаратно реализованного алгоритма ПЛМ [5] –