

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ В ДИНАМИЧЕСКИХ МИКРОСХЕМАХ ПАМЯТИ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

К. И. Хомутов, А. А. Шегал, А. А. Иофин, В. Э. Иванов

Введение

Хорошо известно, что для исследования поведения сложных объектов в условиях воздействия внешней среды широко используются методы математического или натурального моделирования [1–3]. В предлагаемой работе при изучении особенностей хранения информации в динамических микросхемах памяти, на основе которых реализуется оперативная память компьютера (ДБИС ОЗУ) [4], применяется программное обеспечение Matlab/Simulink. Пакет Simulink является составной частью системы моделирования MATLAB и поставляется вместе с ней. Основа его работы – принципы визуально ориентированного программирования с использованием моделей, представленных в виде блоков, структурированных по разделам библиотеки [5].

Поставим задачу: с помощью специализированных блоков Simulink построить модель байтовой ячейки динамической памяти, работающей в условиях естественного радиационного фона и провести сравнительный анализ помехоустойчивости хранения данных при отсутствии и использовании избыточного кода Хемминга [6].

Влияние альфа-частиц на надежность хранения информации в ОЗУ

Динамические микросхемы памяти обладают следующими особенностями:

– запоминающим элементом (ЗЭ) ДБИС ОЗУ является конденсатор C_3 , образованный поликремневой областью канального транзистора (рис. 1) [7]. Под этой областью создается потенциальная яма, которая пуста при хранении «1» и заполнена электронами при хранении «0»;

– ограниченное время хранения заряда запоминающим элементом. Через интервал времени, равный периоду регенерации $t_{рег}$, информацию, хранимую в ЗЭ, необходимо восстанавливать (регенерировать). Наличие дефекта вызывает ток утечки, который может разрядить запоминающую емкость за время, меньшее $t_{рег}$, что приведет к потере информации [4, 7, 8].

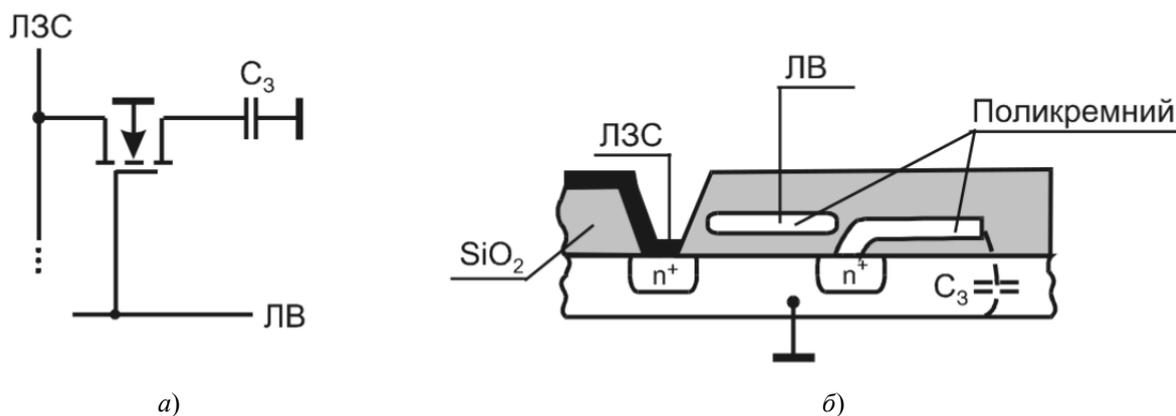


Рис. 1. Схема ячейки динамического ОЗУ:

а – эквивалентная схема; б – МОП-структура: ЛВ – линии выборки; ЛЗС – линии записи-считывания

Содержащиеся в керамических корпусах микросхем остатки урана и тория излучают альфа-частицы [9, 10]. Попадания альфа-частиц в ЗЭ и разрядную шину выбранного ЗЭ вызывают переход логического состояния «1» в «0». Попадания альфа-частиц в невыбранные разрядные шины и ЗЭ приводят к переходу логического «0» в «1». Попадания альфа-частиц в усилители считывания и схемы управления являются источниками сбоев обоих типов: перехода логического состояния «1» в «0» и логического «0» в «1».

Для исправления ошибок хранения информации в ДБИС ОЗУ широко используются специальные корректирующие коды Хемминга, обнаруживающие и исправляющие однобитовые ошибки в *n*-разрядных словах [6]. Так, для 8-разрядного слова информации требуется четыре дополнительных контрольных бита (табл. 1).

Таблица 1

Распределение разрядов 12-битного слова

Номер бита	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Бит данных	D ₈	D ₇	D ₆	D ₅		D ₄	D ₃	D ₂		D ₁		
Контр.биты					P ₈				P ₄		P ₂	P ₁

Контрольные биты определяются по правилам, представленным формулой

$$P1=D1 \oplus D2 \oplus D4 \oplus D5 \oplus D7 ;$$

$$P2=D1 \oplus D3 \oplus D4 \oplus D6 \oplus D7 ;$$

$$P4=D2 \oplus D3 \oplus D4 \oplus D8 ;$$

$$P8=D5 \oplus D6 \oplus D7 \oplus D8 ,$$

где \oplus – поразрядная логическая операция «исключающее или».

Процедура моделирования. На основе данных [3, 4, 7–10] в среде моделирования MATLAB/Simulink разработана имитационная модель битовой ячейки ДБИС ОЗУ, а также собрана байтовая ячейка памяти 8x1, защищенная избыточным кодом Хемминга.

В разработанной модели битовой ячейки ДБИС ОЗУ (рис. 2) используются типовые блоки пакета Simulink: логические блоки: И,ИЛИ, НЕ; памяти, порты ввода и вывода, триггерный блок. Модель имеет входы WL (линия выборки) и BL (линия записи), выход (OUT) работает как продолжение ЛЗС, через него осуществляется чтение бита. Наличие триггера, обозначенного Cs1, определяет модель как квазидинамическую ячейку, поскольку хранение данных зависит от изменения состояния триггера, а разряд конденсатора во время хранения не учитывается.

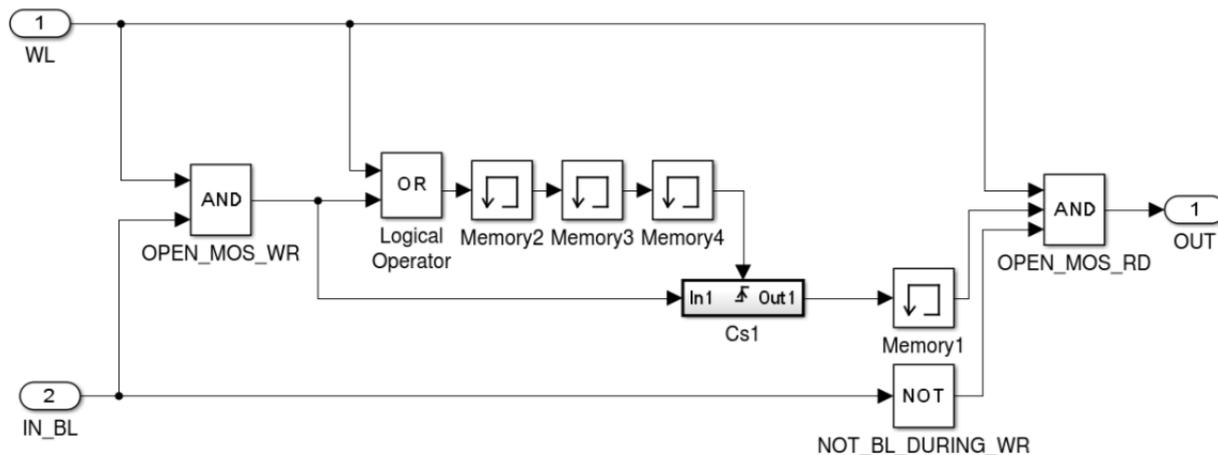


Рис. 2. Модель битовой динамической ячейки памяти

Также были построены следующие модели:

- битовая ячейка с возможностью принудительной записи нуля или единицы при подаче импульса на входы ERR0 и ERR1. Так моделируется пролет альфа-частицы через каждую битовую ячейку;
- усилитель считывания, который представляет собой триггер, реагирующий на импульс, поступающий при чтении содержимого битовой ячейки. По стробу OE осуществляется защелкивание значения считанного бита;
- блок REFRESH, реализующий восстановление записанного в ячейке памяти бита после операции чтения. В общей схеме эксперимента этот блок помещается между генератором управляющих сигналов (RAS, WE, выбор строки WL) и ячейкой памяти. Схемы перечисленных выше

устройств объединены с помощью блока Subsystem в отдельные макроблоки: BitCell, SA и REFRESH, на основе которых собрана структура 8-разрядной ячейки динамического ОЗУ (рис. 3);

– генератор ошибок, имитирующий воздействие альфа частиц (рис. 4). Схема выполнена на основе библиотечного блока генератора случайной бинарной последовательности с распределением Бернулли [11]. Для распределения Бернулли задается вероятность p – неоявления альфа частицы (событие «0»), соответственно, вероятность появления альфа частицы равна $(1-p)$, где $0 \leq p \leq 1$. Также используются 16 блоков Unbuffer, с помощью которых реализуется возможность появления ошибки в любом бите 16-разрядного слова, эмулированного в эксперименте. Поскольку для моделируемой 8-разрядной ячейки требуется четыре дополнительных контрольных бита (см. табл. 1) в модели генератора ошибок используются четыре заглушки (Terminator);

– генератор управляющих сигналов, в котором управляющие сигналы реализуются блоком Signal Builder (рис. 5). В модели используется только одна байтовая ячейка, поэтому можно обойтись без stroba выбора столбца. По переднему фронту сигнала регистрации ошибки (EDS) выявляется несоответствие считанного и записанного битов данных. При проведении эксперимента количество несоответствий суммируется и определяется общее количество выявленных ошибок.

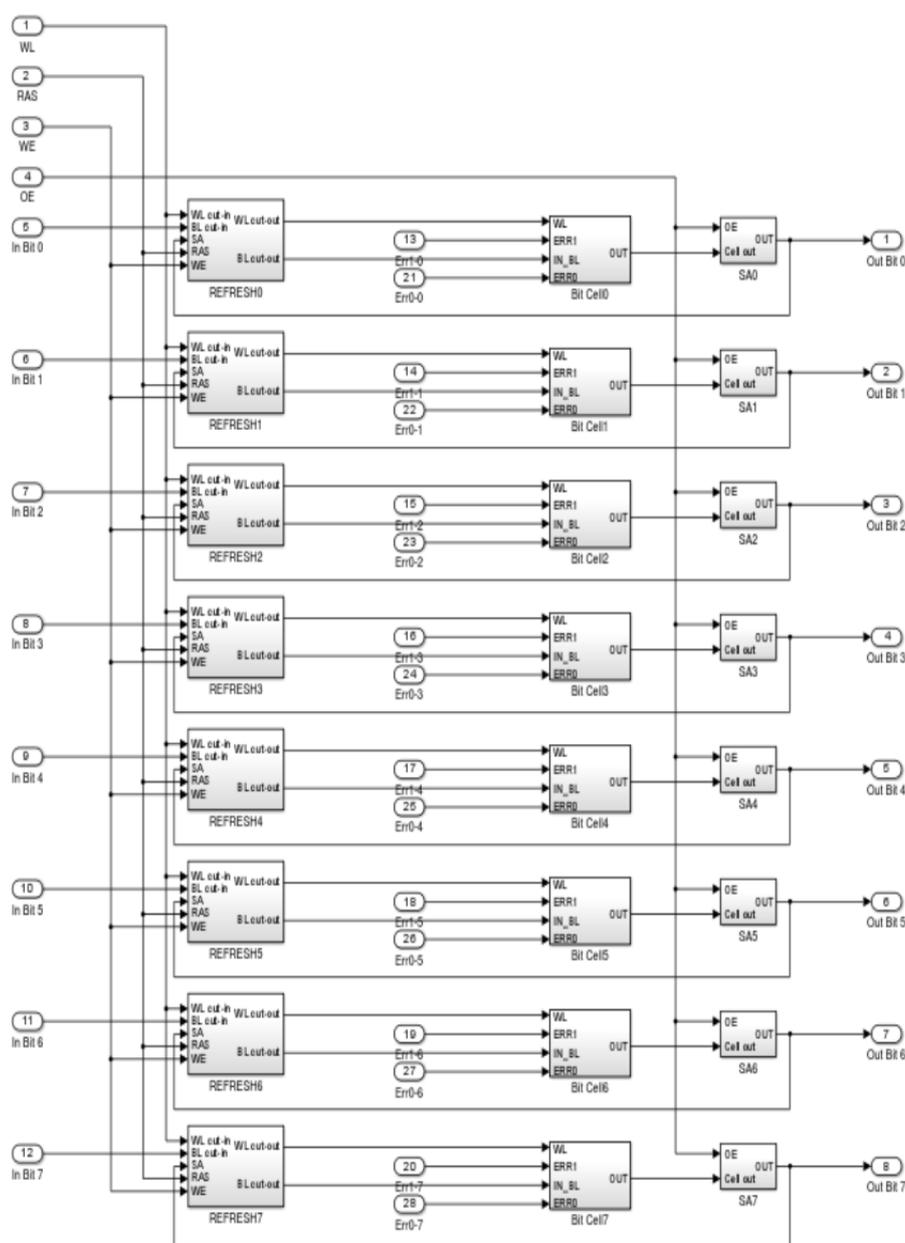


Рис. 3. Модель байтовой ячейки динамической памяти

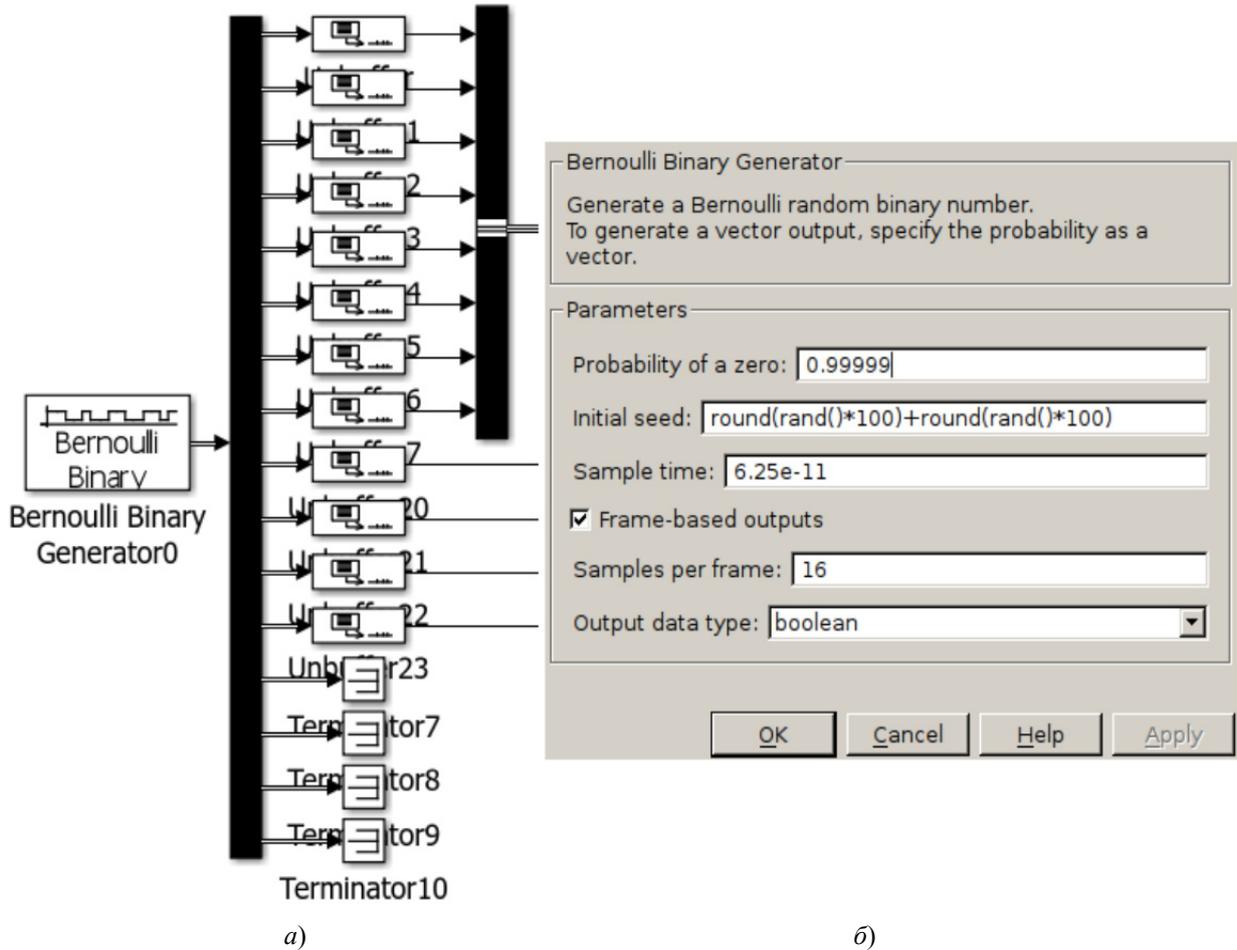


Рис. 4. Модель генератора ошибок (а) и настройки блока генератора Бернулли (б)

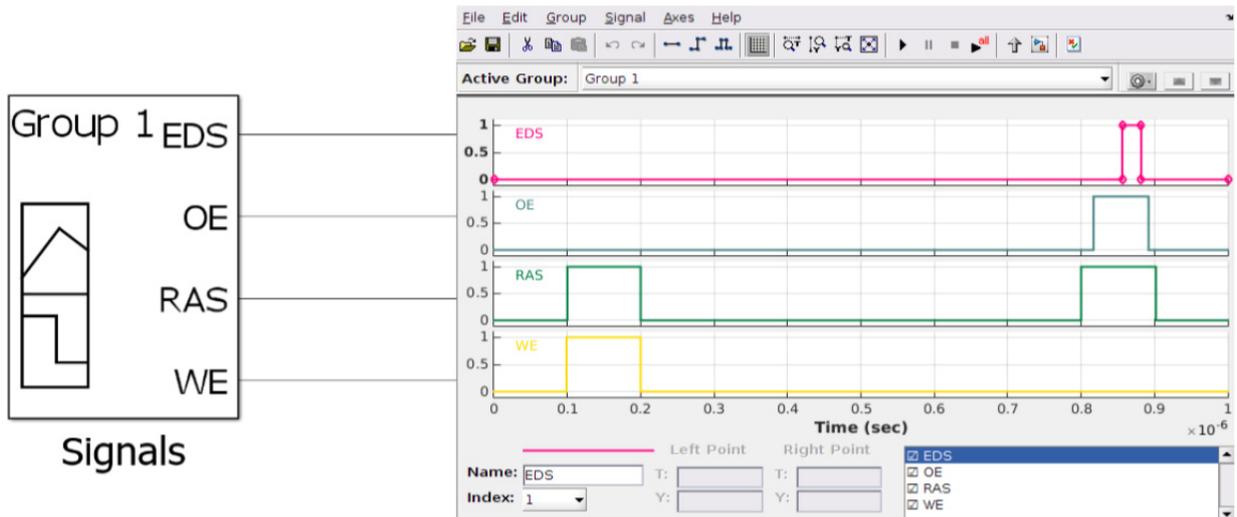


Рис. 5. Модель генератора управляющих сигналов (а), временные диаграммы его работы (б)

Схема проведения эксперимента. Из описанных выше блоков построена схема, с помощью которой исследуется влияние кодов Хэмминга на количество ошибок памяти, вызванное воздействием альфа-частиц. Помимо указанных выше блоков (см. рис. 3–5), в схеме эксперимента используются библиотечные функциональные блоки кодера и декодера Хемминга (16:12).

Эксперимент запускался с помощью разработанного *m*-файла (Matlab), текст которого представлен ниже (рис. 6).

```

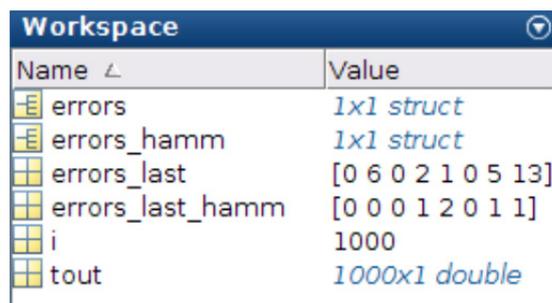
errors = [0 0]; % Обнуление массивов ошибок
errors_hamm = [0 0];
set_param('test_final/IN_bit0', 'Value', '1');%входные данные
set_param('test_final/IN_bit1', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit2', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit3', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit4', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit5', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit6', 'Value', '1');
set_param('test_final/IN_bit7', 'Value', '1');
% проверяем код 1111111b, отключаем генератор ложных единиц
set_param('test_final/Bernoulli Binary Generator1','P','1');
% устанавливаем вероятность появления ошибок в генераторе ложных нулей
set_param('test_final/Bernoulli Binary Generator0','P','0.99999');
for i = 1:1000% одна тысяча опытов
% запуск моделирования
set_param('test_final', 'SimulationCommand', 'start');
i% вывод номера текущего опыта в консоль MATLAB
pause(2);% задержка в 2 сек. – гарантия выполнения текущего опыта
end

```

Рис. 6. Текст *m*-файла для запуска эксперимента

Использовались следующие параметры моделирования: время моделирования – 1 мкс, шаг моделирования – 1 нс.

После проведения 1000 опытов получены результаты моделирования в виде вектора ошибок в рабочей области Simulink – Workspace (рис. 7).



Name	Value
errors	1x1 struct
errors_hamm	1x1 struct
errors_last	[0 6 0 2 1 0 5 13]
errors_last_hamm	[0 0 0 1 2 0 1 1]
i	1000
tout	1000x1 double

Рис. 7. Результаты моделирования

Каждый элемент вектора – сумма накопленных несоответствий между записанным и считанным битом по всему эксперименту. В векторе *errors* фиксируются ошибки хранения 8-разрядного слова без применения кода Хэмминга, в переменной *errors_hamm* – накопленные ошибки хранения с применением помехозащищенного кодирования. Поскольку коды Хэмминга позволяют исправлять одиночные ошибки, в векторе *errors_last_hamm* представлены ошибки большей разрядности. Полученный результат позволяет судить об эффективности применения кода Хэмминга в системах хранения информации: количество ошибок в векторе *errors last* в 5,4 раза превышает количество ошибок, накопленное в векторе *errors last_hamm*.

Выводы и рекомендации. На базе программного комплекса Matlab/Simulink впервые построена модель ячейки динамической памяти на фоне естественного радиационного излучения и исследовано влияние помехоустойчивого кода Хемминга на надежность хранения информации. Предлагаемая модель может быть использована для исследования работы тестов, контролирующей работу ОЗУ, а также изучения влияния повышенного радиационного фона, особенно в космическом пространстве на надежность работы динамических микросхем памяти.

Библиографический список

1. Острейковский, В. А. Теория систем : учебник / В. А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 1997. – 240 с.
2. Полтавский, А. В. Концепция принятия решений при создании сложных технических систем / А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 8–12.

3. Чаусов, М. В. Учебная модель функционирования статического оперативного запоминающего устройства / М. В. Чаусов, С. С. Смирнов, С. М. Чаусова // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2010. – № 2 (22). – URL: <https://www.isuct.ru/e-publ/snt/sites/ru.epubl.snt/files/2010/>
4. Столингс, У. Структурная организация и архитектура компьютерных систем : пер. с англ. / У. Столингс. – 5-е изд. – М. : Вильямс, 2002. – 896 с.
5. Дьяконов, В. П. MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 976 с.
6. Орлов, С. А. Организация ЭВМ и систем : учебник для вузов / С. А. Орлов, Б. Я. Цилькер. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2011. – 688 с.
7. Угрюмов, Е. П. Цифровая схемотехника : учеб. пособие для вузов / Е. П. Угрюмов. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 816 с.
8. SIEMENS HYB 3164(5)800AJ/AT(L) 8Mx8-DRAM Datasheet // Semiconductor Group. – 2009. – URL: <http://pdf.dzsc.com/20090603/200903051124143712.pdf>.
9. Зебрев, Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции / Г. И. Зебрев // НИЯУМИФИ. – 2010. – URL: http://www.researchgate.net/profile/Gennady_Zebrev/publication/268277455_Radiation_Effects_in_Silicon_High_Scaled_Integrated_Circuits_in_Russian/links/
10. Огнев, И. В. Надежность запоминающих устройств / И. В. Огнев, К. Ф. Сарычев. – М. : Радио и связь, 1988. – 454 с.
11. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608с.

Хомутов Константин Игоревич

магистрант,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.a.shegal@urfu.ru

Шегал Анна Айзиковна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники и связи,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.a.shegal@urfu.ru

Иофин Александр Аронович

кандидат технических наук,
заместитель главного конструктора,
АО «Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская область,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: tehdep630@yandex.ru

Иванов Вячеслав Элизбарович

доктор технических наук, профессор,
кафедра радиоэлектроники и связи,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: v.e.ivanov@urfu.ru

Khomutov Konstantin Igorevich

master degree student,
Institute of Radioelectronics
and Information Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Shegal Anna Ayzikovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics and
communications,
Institute of Radioelectronics and Information
Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Iofin Alexander Aronovich

candidate of technical sciences, deputy chief designer,
JSC «Ural Design Bureau «Detal»
(623409, 8 Pionerskaya street,
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

Ivanov Vyacheslav Elizbarovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of Radio electronics and
communications,
Institute of Radioelectronics and Information
Technologies – RTF,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Аннотация. Показано, что при изучении особенностей хранения информации в динамических микросхемах памяти, на основе которых реализуется оперативная память компьютера, широко применяется программное обеспечение Matlab/Simulink. Пакет Simulink является составной частью системы моделирования MATLAB и поставляется вместе с ней. Основа его работы – принципы визуально ориентированного программирования с использованием моделей, представленных в виде блоков, структурированных по разделам библиотеки. Решена задача: с помощью специализированных блоков Simulink построить модель байтовой ячейки динамической памяти, работающей в условиях естественного радиационного фона и провести сравнительный анализ помехоустойчивости хранения данных при отсутствии и использовании избыточного кода Хемминга. Впервые построена модель ячейки динамической памяти на фоне естественного радиационного излучения и исследовано влияние помехоустойчивого кода Хемминга на надежность хранения информации. Предлагаемая модель используется для исследования работы тестов, контролирующей работу ОЗУ, а также изучения влияния повышенного радиационного фона, особенно в космическом пространстве на надежность работы динамических микросхем памяти.

Ключевые слова: надежность, моделирование, ячейка динамической памяти, Matlab/Simulink, помехоустойчивое кодирование, радиационный фон.

Abstract. It is shown that, when examining the characteristics of the storage of information in dynamic memory chips based on the sale of computer memory widely used software Matlab/Simulink. Batch Simulink is an integral part of the MATLAB simulation systems and comes along with it. The basis of his work is visually-oriented programming principles using models presented in the form of blocks, structured by sections of the library. The problem with the help of specialized units to build a model cell byte Simulink dynamic memory running under conditions of natural background radiation and a comparative analysis of noise in the absence of data storage and Use redundant code Hamming. First model of dynamic memory cells on natural background radiation and the influence of noise on reliability of Hamming code information. The proposed model is used to study the work of controlling the test work RAM, as well as the impact of elevated radiation levels, especially in outer space on dynamic reliability of memory chips.

Key words: reliability, modeling, dynamic memory cell, Matlab / Simulink, error – correctional coding, radiation background.

УДК 621.396

Хомутов, К. И.

Моделирование надежности хранения данных в динамических микросхемах памяти в среде Matlab/Simulink / К. И. Хомутов, А. А. Шегал, А. А. Иофин, В. Э. Иванов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 73–79. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-11.