

УДК 621.3.015

М.Е. Комнатнов

Методика оценки уровня излучаемой помехоэмиссии интегральной схемы в ТЕМ-камере при температурном воздействии

Интегральные схемы (ИС), применяемые в радиоэлектронных средствах (РЭС), создают электромагнитное излучение, анализ уровня которого проводят при обеспечении электромагнитной совместимости. В реальных условиях эксплуатации РЭС подвергаются воздействию температуры, что оказывает влияние на амплитуды и частоты излучаемой помехоэмиссии ИС. Предложены методика и алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС при заданном температурном воздействии, с помощью которых измерен уровень излучаемой помехоэмиссии МК K1986BE91T в широких диапазонах частот (150 кГц – 1 ГГц) и температур (от –50 до 150 °С). Показано, что на основной частоте тактирования, вблизи 80 МГц и 2-й гармонике, воздействие температуры не оказывает влияние на уровень излучаемой помехоэмиссии МК, а его изменение не превышает $\pm 0,3$ дБ. Работа различных блоков МК при увеличении его температуры от –50 до +150 °С снижает на 5,5 дБ максимальный уровень излучаемой помехоэмиссии МК в диапазоне частот 8–27 МГц. Наиболее зависимые от температуры уровни помехоэмиссии наблюдаются до 6-й гармонике частоты тактирования МК и достигают 35,8 дБмкВ, что на 5,7 дБ выше по сравнению с измеренным уровнем при нормальной температуре.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, ТЕМ-камера, помехоэмиссия, интегральная схема.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-30-36

Увеличение рабочих частот, снижение уровня питающих напряжений и переход на субмикронные технологии производства приводят к повышению уровней электромагнитной эмиссии (помехоэмиссии) [1] и восприимчивости электронных компонентов к внешним электромагнитным помехам (ЭМП) [2]. Высокие токи потребления быстродействующих интегральных схем (ИС), используемых в современных мобильных устройствах связи с рабочими частотами 5–6 ГГц [3], могут создавать электромагнитное излучение (ЭМИ) наравне с антеннами [4]. Анализ излучаемой помехоэмиссии ИС является сложной задачей, поскольку вклад в результирующий уровень вносит каждый функциональный блок [5]. Например, при работе блоков микроконтроллера (МК) повышение уровня помехоэмиссии может зависеть не только от системной частоты его арифметико-логического устройства (АЛУ) и процессора в целом, но и от типа используемой памяти [6].

Измерения уровня помехоэмиссии ИС проводят при нормальных климатических условиях (23 ± 5 °С, 40–60%), применяя стандартизированные методики [7, 8]. Используя ТЕМ-камеры, оценивают в соответствии со стандартом [7] уровень помехоэмиссии от экранированных ИС [9] и определяют влияние на них типа источника питания [10] и режима работы [11] МК. Для более детальной оценки излучаемой помехоэмиссии в ТЕМ-камере методики модифицируют, например, применяя направленный ответвитель со сдвигом фаз на 180° [12]. Кроме того, совмещают результаты измерений, проводимых в ТЕМ-камере, с методом поверхностного сканирования [13] и применяют математические модели на основе эквивалентных дипольных моментов [14].

В реальных условиях эксплуатации РЭС подвергается влиянию температуры [15], влияющей на излучаемую помехоэмиссию ИС [16]. При этом из-за

температуры изменяются характеристики пассивных и активных компонентов [17]. Например, ёмкости конденсаторов тактового генератора могут повлиять на время запуска МК или рабочую частоту во время его работы [18]. В результате, использование различных блоков МК с изменением параметров их работы может повлиять на уровень помехоэмиссии в реальных условиях эксплуатации, что необходимо учитывать на этапе проектирования РЭС, проводя оценку и локализацию источников ЭМП.

Цель работы – предложить методику и оценить с её помощью уровень излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере при температурном воздействии.

Методика измерения уровня излучаемой помехоэмиссии интегральной схемы в ТЕМ-камере

Измерение уровней излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере проводят при её размещении на специальной измерительной ПП (1), соответствующей стандартам [7, 8], при нормальной температуре ($+23 \pm 5$ °С). Измерительная ПП (1) устанавливается в апертуру ТЕМ-камеры, один порт которой соединяется с согласованной нагрузкой (2), а другой – с измерительным приёмником (ИП) или анализатором спектра (3) (рис. 1) через внутренний или внешний аттенуатор (4).

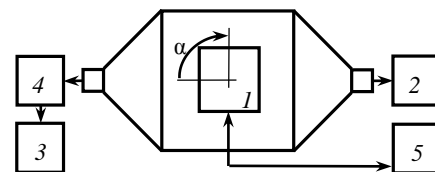


Рис. 1. Схема измерительной установки для оценки излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере

Используя ИП с выбранным детектором, измеряют напряжение на его входе при последовательном повороте ИС относительно центрального про-

водника ТЕМ-камеры на угол $\alpha = 90^\circ$. Устройством мониторинга (5) может являться программатор для МК, которым проверяется корректность выполняемой задачи, или, например, осциллограф, которым контролируют параметры ИС, после чего устройство отключается.

Алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере (рис. 2) включает следующие этапы:

1. Собирается и настраивается измерительная установка. Выбирается в ИП квазипиковый или пиковый детектор в режиме накопления максимальных значений.

2. Проверяется работоспособность ИС-устройством мониторинга.

3. Устанавливается диапазон частот согласно [7]: 0,15–30 МГц с разрешением по полосе частот 9 кГц по уровню 6 дБ для ИП и 10 кГц по уровню 3 дБ для анализатора спектра; 0,03–1 ГГц с разрешением по полосе частот 120 кГц для ИП и 100 кГц для анализатора спектра. Для специальных случаев, не регламентированных [7], он делится на поддиапазоны от низких до высоких частот, например: 9–150 кГц, 0,15–1 МГц, 1–30 МГц и т.д.

4. Настраиваются скорость свипирования (развертки), чувствительность преселектора ИП и измеряются напряжения $|U|(f)$ на входе ИП в исследуемом диапазоне частот при заданном положении угла α ИС относительно центрального проводника ТЕМ-камеры.

5. Изменяется угол α измерительной ПП с ИС на 90° в апертуре ТЕМ-камеры относительно её центрального проводника, и измерения повторяются.

6. Сравниваются измеренные максимумы $|U|(f)$ с кривыми из [7] в требуемом диапазоне частот, и для них присваивается норма соответствия.

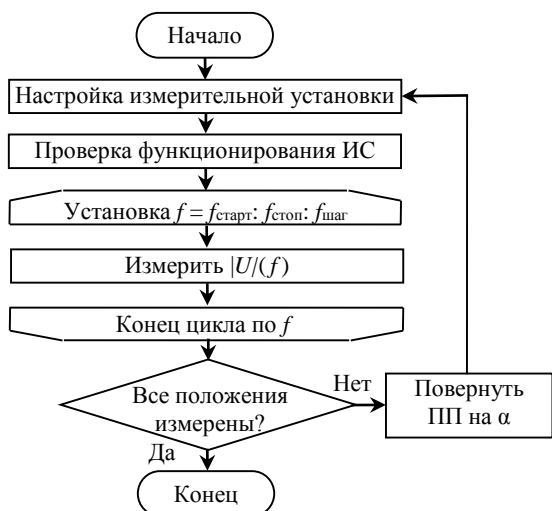


Рис. 2. Алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере при нормальной температуре

В результате, используя методику и алгоритм, можно измерить уровень излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере, который при необходимости

сопоставляют с результатами измерения в безовой (БЭК) или реверберационной (РК) камерах, пересчитывая $|U|(f)$ с использованием электрических и магнитных дипольных моментов [7, 19, 20].

Методика измерения уровня излучаемой помехоэмиссии интегральной схемы в ТЕМ-камере при температурном воздействии

Методика измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере при температурном воздействии предполагает аналогичные этапы измерения ИС в ТЕМ-камере, размещенной в температурной или климатической камерах. Измерения при температурном воздействии проводят после измерений при нормальной температуре.

Схема установки для измерения уровня излучаемой помехоэмиссии (рис. 3) включает испытуемую ИС (1), размещенную в апертуре ТЕМ-камеры (2), с подключенной к камере согласованной нагрузкой (3). Электропитание измерительной ПП осуществляется от аккумуляторной батареи (АКБ) (4). Для контроля работоспособности ИС используются устройства мониторинга (5), подключаемые к рабочей станции (6). Кроме того, используя рабочую станцию (6), управляют температурной или климатической камерой (7) и процессом измерения в целом. Измерение уровня излучаемой помехоэмиссии от ИС при температурном воздействии проводят, подключив ко входу ТЕМ-камеры (2), через внутренний или внешний аттенуатор (8), ИП или анализатор спектра (9), которым измеряют $|U|(f)$.

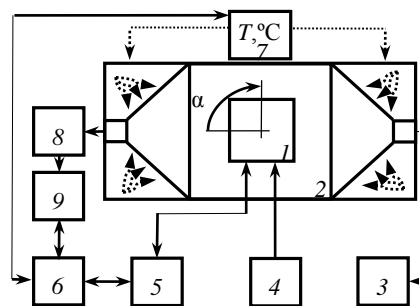


Рис. 3. Схема измерительной установки для оценки излучаемой помехоэмиссии ИС в ТЕМ-камере при температурном воздействии

Алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии при температурном воздействии (рис. 4) аналогичен приведенному на рис. 2, но включает цикл для изменения с заданным шагом температуры воздействия на поверхность ТЕМ-камеры с измерительной ПП. При этом настройка температуры проводится после настройки ИП и контроля работоспособности ИС устройством мониторинга, а температура изменяется после измерения $|U|(f)$ в заданном диапазоне частот.

Сборка и настройка измерительной установки включают размещение ТЕМ-камеры в климатической или температурной камерах. При этом используются термостабильные кабельные сборки минимальной длины. Измерения частотной зависимости уровня помехоэмиссии проводят в климатической

камере при относительной влажности воздуха 40–60% с выдерживанием заданной температуры в течение не менее 30 с. При этом в соответствии с алгоритмом измерения (см. рис. 4) для климатической камеры («тепло–холод» или «тепло–холод–влага») изначально задаётся режим охлаждения от нормальной температуры до нижней рабочей температуры ИС, и далее от неё до верхней рабочей температуры ИС – режим нагрева. Данные режимы выбраны для повышения эффекта теплового удара, проявляющегося при воздействии градиента температур на разных участках измерительной ПП и ИС, изменяющиеся параметры металлов и диэлектриков, а следовательно, плотность поверхностного тока на ИС. В результате дестабилизирующее воздействие проявляется не только за счет электрического воздействия, но и вследствие теплового удара, что является более экстремальным режимом работы для ИС и приводит к максимальным уровням излучаемой помехоэмиссии.

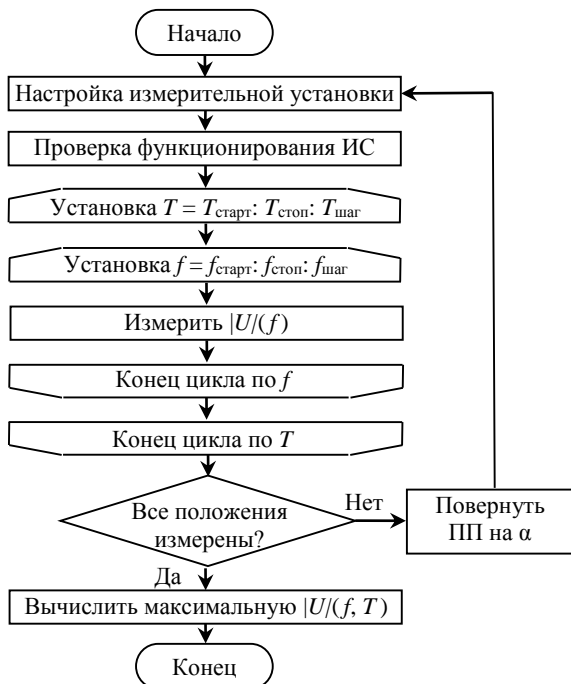


Рис. 4. Алгоритм измерения уровня излучаемой помехоэмиссии ИС при температурном воздействии

В результате, используя методику, можно измерить уровни излучаемой помехоэмиссии при температурном воздействии, что позволит симитировать реальные и экстремальные условия эксплуатации ИС, а на этапе проектирования ИС – учесть и снизить помехоэмиссии от них и РЭС в целом.

Измерение излучаемой помехоэмиссии микроконтроллера в ТЕМ-камере при температурном воздействии

Создана в соответствии со стандартом [7] измерительная ПП размерами 100×100 мм (рис. 5). В качестве ИС выбран МК K1986BE91T, имеющий ядро ARM Cortex M3. Схема измерительной ПП включает фильтры для ослабления ЭМП по цепи

электропитания МК, отладочный интерфейс (Joint Test Action Group (JTAG)) для программирования, а также дополнительные интерфейсы ввода/вывода сигналов, в том числе для блоков аналого-цифрового (АЦП) и цифроаналогового (ЦАП) преобразователей. Также измерительная ПП содержит кнопки управления, светодиоды для индикации работы при испытании и кварцевые резонаторы на 8 МГц и 32 кГц.

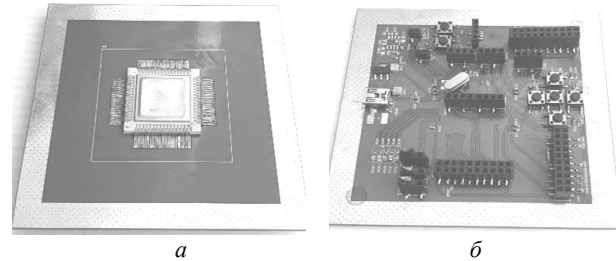


Рис. 5. Измерительная ПП с МК K1986BE91T: вид со стороны ИС (а) и компонентов (б)

Конструктивно измерительная ПП со стороны размещения МК (рис. 5) имеет сплошной полигон «земли», а с другой стороны – периферийные устройства и компоненты для его функционирования, соединенные с ним через сквозные металлизированные отверстия под корпусом МК. Края ПП содержат сплошные полигоны «земли» (без паяльной маски) для электрического контакта с корпусом ТЕМ-камеры.

Исследуемый МК программировался тестовыми задачами, задействующими определённые функциональные блоки МК, что позволило комплексно оценить уровни излучаемой помехоэмиссии МК при его максимальной нагрузке [21]. В качестве тестовой задачи для АЛУ использовалась стандартизированная задача умножения матриц, используемая в сложных вычислительных алгоритмах. Тестовая задача для АЦП обрабатывала данные от внутренних датчиков температуры и напряжения. Также тестовыми задачами формировались сигнал ШИМ таймерами с частотой 9 кГц, быстрый режим чтения входного сигнала портами и асинхронная передача данных по UART и CAN интерфейсам. Тактовый генератор МК работал с множителем на 10 от внешнего кварцевого резонатора (8 МГц) на максимальной частоте (80 МГц) тактирования МК.

Собрана установка (рис. 6) по схеме на рис. 3, включающая ТЕМ-камеру [22], ИП Rohde&Schwarz ESPR7, камеру «тепло-холод» Espec SU-262, согласованную нагрузку сопротивлением 50 Ом, АКБ и измерительную ПП с исследуемым МК K1986BE91T. Измерения $|U|(f)$ проводились по алгоритму из рис. 4. После включения внешнего источника электропитания измерительной ПП и проверки корректности функционирования МК программатором частотная зависимость $|U|(f)$, формируемая наведенными токами от МК на центральный проводник ТЕМ-камеры, измерялась на её входе ИП.

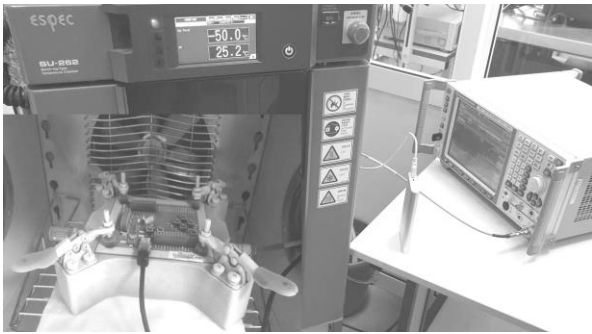


Рис. 6. Установка для измерения уровня излучаемой помехоэмиссии МК в малогабаритной ТЕМ-камере, размещенной внутри камеры «тепло-холод»

Измерены уровни излучаемой помехоэмиссии от МК в диапазонах частот 0,15–30 МГц и 0,03–1 ГГц и температур (T) от минус 50 до +150 °С. Диапазоны выбраны в соответствии с рабочими параметрами устройства, в котором предполагалось использовать МК. Измерение частотных зависимостей $|U|(f)$ проводилось с шагом 10 °С. Они представлены на рис. 7 при нормальной температуре (+20 °С) и на краях температурного диапазона минус 50 и +150 °С.

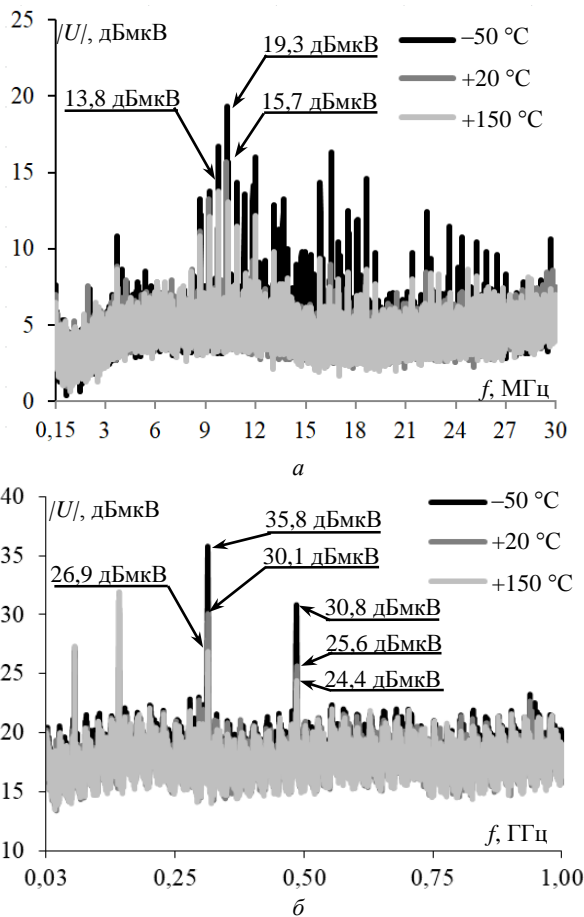


Рис. 7. Частотные зависимости $|U|$, измеренные на входе ИП для МК K1986BE91T при разных T и диапазонах частот: 0,15–32 (а) и 32–1000 (б) МГц

Из рис. 7, а виден рост уровня помехоэмиссии в диапазоне частот 8–27 МГц, что связано с формированием ШИМ-сигналов и работой блока АЛУ. При

$T = -50$ °С уровень помехоэмиссии максимален (19,3 дБмкВ вблизи 10 МГц), а рост T до +150 °С уменьшает его на 5,5 дБ до 13,8 дБ.

Из рис. 7, б виден рост уровня помехоэмиссии на 10–15 дБ на частотах выше 30 МГц, вызванный увеличением разрешения до 120 кГц в полосе частот преселектора ИП. Максимальный уровень помехоэмиссии достигает 24–36 дБ вблизи частоты тактирования МК 83 МГц и её гармоник (167, 334 и 501 МГц). Так, вблизи частоты тактирования МК 83 МГц и её 2-й гармоники (167 МГц) существенных изменений уровня и частоты излучаемой помехоэмиссии при воздействии температуры не наблюдается (рис. 8). При этом изменение уровня помехоэмиссии вблизи частоты тактирования МК (см. рис. 8, а) при воздействии на него температуры не более $\pm 0,3$ дБ и при $T = +20$ °С составляет 27,2 дБмкВ, а при температурах +150 и -50 °С – 27,5 и 26,9 дБмкВ соответственно. Аналогичное ($\pm 0,3$ дБ) изменение наблюдается вблизи 2-й гармоники от частоты тактирования (см. рис. 8, б) и при $T = -50$ °С составляет 31,6 дБмкВ, а при температурах +20 и +150 °С – 31,9 дБмкВ. Кроме того, из рис. 8 видно, что при минимальной и максимальной температурах уровень помехоэмиссии смещается вниз на 0,3–0,6 МГц относительно частоты измеренного уровня при нормальной температуре.

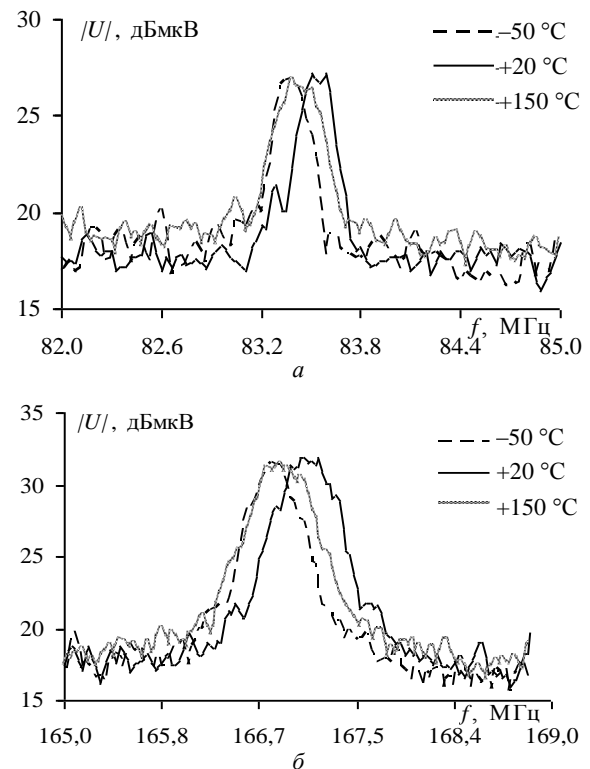


Рис. 8. Частотные зависимости $|U|$ на основной (80 МГц) и 2-й гармонике частоты тактирования МК K1986BE91T при разных температурах

Существенные различия уровней помехоэмиссии при изменении T наблюдаются на 4-й (рис. 9, а) и 6-й (рис. 9, б) гармониках частоты тактирования

МК. Так, рост T от -50 до $+20$ °С уменьшает $|U|$ с 35,8 до 30,1 дБмкВ вблизи 334 МГц и с 30,8 до 25,6 дБмкВ вблизи 501 МГц. Дальнейший рост T до $+150$ °С снижает $|U|$ с 30,1 до 26,9 дБмкВ вблизи 334 МГц и с 25,6 до 24,4 дБмкВ вблизи 501 МГц.

Детальный анализ (см. рис. 9) показал, что с ростом T от -50 до $+90$ °С уровень помехоэмиссии достигает 35,8 дБмкВ на частоте 333,7 МГц и увеличивается по частоте на 1 МГц, а его уровень снижается на 5 дБ. Дальнейший нагрев МК от $+90$ до $+150$ °С снижает частоту максимума помехоэмиссии с 334,7 до 333,1 МГц и уровень помехоэмиссии до 26,9 дБмкВ. Из рис. 9, б видно, что вблизи 6-й гармоники максимум помехоэмиссии (30,8 дБмкВ) проявляется при $T = -50$ °С и с ростом T до $+20$ °С постепенно уменьшается до 25,6 дБмкВ, при этом увеличив его по частоте (до 501,9 МГц) на 1 МГц. Рост T до $+90$ °С изначально приводит к повышению максимума на 1,6 дБ, но при дальнейшем повышении T до $+150$ °С – к его снижению до 24,4 дБмкВ, а частота снижается до 500,1 МГц. В результате наибольшее влияние на уровень излучаемой помехоэмиссии МК 1986ВЕ91Т оказывает отрицательная температура, воздействие которой приводит к его повышению на 5,7 дБ.

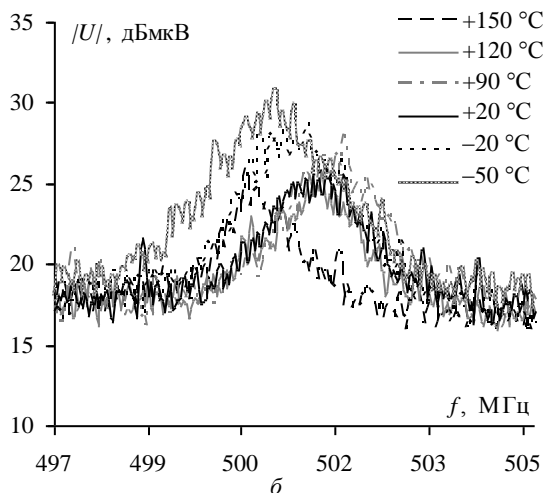
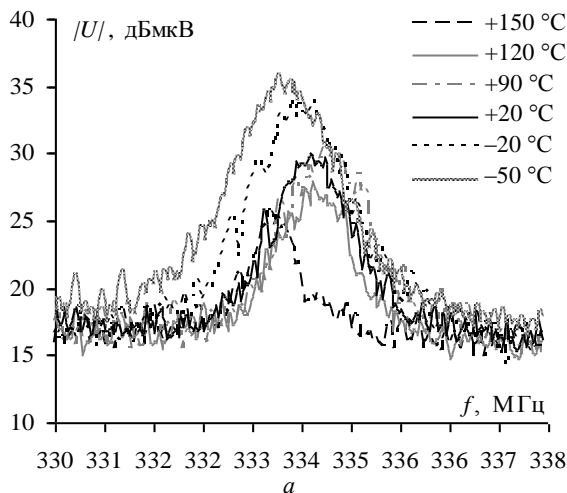


Рис. 9. Частотные зависимости максимумов $|U|$, на 4-й (а) и 6-й (б) гармониках частоты тактирования МК К1986ВЕ91Т

Заключение

Предложена методика оценки уровня излучаемой помехоэмиссии ИС при температурном воздействии, включающая алгоритм измерения с внешним циклом по температуре. На её основе исследованы уровни излучаемой помехоэмиссии МК К1986ВЕ91Т в диапазоне температур от -50 до $+150$ °С. Показано, что увеличение уровня помехоэмиссии в диапазоне частот 8–27 МГц объясняется формированием ШИМ-сигналов и работой блока АЛУ, а также частотами тактирования (80 МГц) и гармоник (до 6).

При изменении температуры от -50 до $+150$ °С максимальный уровень помехоэмиссии снижается с 19,3 до 13,8 дБмкВ в указанном диапазоне частот. На основной частоте тактирования вблизи 80 МГц и 2-й гармоники воздействие температуры не оказывает влияние на уровень помехоэмиссии МК, а его изменение не превышает $\pm 0,3$ дБ. Максимальные уровни помехоэмиссии, зависящие от температуры, наблюдаются на 4-й и 6-й гармониках частоты тактирования и составляют 35,8 и 30,8 дБмкВ на частотах 333,7 и 500,9 МГц, что выше на 5,7 и 5,2 дБ соответственно, чем измеренные уровни при нормальной температуре.

В результате уровень помехоэмиссии зависит как от выполняемых функций ИС (тестовой задачей, задействующей определенные функциональные блоки ИС), так и от токов, протекающих по межсоединениям (межсоединения кристалла ИС с электродами корпуса, корпуса и его электродов, посадочного места с электродами ИС), амплитуда которых зависит от частоты и температуры. Учет влияния межсоединений ИС имеет важное значение, поскольку для рассматриваемой ИС габариты корпуса и посадочного места велики в связи со специальным назначением ИС. В этой связи на уровни излучаемой помехоэмиссии ИС влияют не только температура и типоразмер корпуса, но и задействованные блоки, а также её топология.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Литература

- ГОСТ 30372–2017. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 58 с.
- Ramdani M. The electromagnetic compatibility of integrated circuits – Past, present, and future / M. Ramdani, E. Sicard, A. Boyer et al. // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2009. – Vol. 51, No. 1. – P. 78–100.
- Mohajer-Iravani B. Reactive power radiated from the planar electromagnetic bandgap structures, a source of EMI in high speed packages / B. Mohajer-Iravani, O.M. Ramahi // IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation. – 2011. – P. 1840–1843.
- Song E. A component-level radio-frequency interference evaluation method for mobile devices / E. Song, H.H. Park // IEEE Trans. on Electromag. Compat. – 2013. – Vol. 55, No. 6. – P. 1358–1361.
- Muccioli J.P. Predicting module level RF emissions from IC emissions measurements using a 1 GHz TEM or GTEM cell – a review of related published technical papers /

J.P. Muccioli, T.M. North, K.P. Slattery // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). – 2008. – P. 1–7.

6. Lin H.-N. Analysis of EMI effect on flash memory IC / H.-N. Lin, C.-W. Kuo, C.-K. Cheh et. al. // IEEE Int. Asia-Pacific Symp. on Electromagn. Compat. (APEMC). – 2012. – P. 757–760.

7. IEC 61967-2:2005. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz. – Part 2: Measurement of radiated emissions – TEM cell and wideband TEM cell method. – First Edit., 2005. – 43 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/6185>, свободный (дата обращения: 31.03.2024).

8. IEC 61000-4-20:2022. Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 4-20: Testing and measurement techniques – Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides. – 2022. – 229 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/34378> (дата обращения: 31.03.2024).

9. Park H.H. Simple shielding evaluation method of small shield cans on printed circuit boards in mobile devices // Electronics Letters. – 2013. – Vol. 49, No. 15. – P. 936–938.

10. Demakov A.V. Research of radiated emissions of a microcontroller using various power supplies / A.V. Demakov, V.A. Semenjuk, M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Novosibirsk, Russia, 2021. – P. 1–4.

11. Measurement of microcontroller radiated emissions at different operation modes / A.V. Demakov, A.V. Osintsev, V.A. Semenjuk et al. // IEEE 21th Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials. – Chelam, Russia, 2021. – P. 193–197.

12. Boyer A. Low-Cost broadband electronic coupler for estimation of radiated emission of integrated circuits in TEM-cell / A. Boyer, S. Dhia // IEEE Trans. on Electromag. Compat. – 2021. – Vol. 63, No. 2. – P. 636–639.

13. Zhang J. Source reconstruction for IC radiated emissions based on magnitude-only near-field scanning / J. Zhang, J. Fan // IEEE Trans. on Electromag. Compat. – 2017. – Vol. 59, No. 2. – P. 557–566.

14. Capriglione D. Accurate models for evaluating the direct conducted and radiated emissions from integrated circuits / D. Capriglione, A.G. Chiariello, A. Maffucci // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, No. 4. – P. 477.

15. Parker W.H. The case for combining EMC and environmental testing / W.H. Parker, W. Tustin, T. Masone // ITEM. – 2002. – P. 54–60.

16. Dhia S.B. Thermal influence on 16-bits microcontroller emission / S.B. Dhia, E. Sicard, Y. Mequignon et al. // IEEE Int. Symp. on Electromag. Compat. – 2007. – P. 1–4.

17. Комнатнов М.Е. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2014. – Т. 34, № 4, ч. 1. – С. 39–45.

18. Dienot J.M. Dual experimental approach for thermal impacts on electromagnetic behavior of electronic circuit board configurations / J.M. Dienot, E. Batista, M. Bernard // IEEE Trans. on Instrum. and Measur. – 2008. – Vol. 57, No. 11. – P. 2405–2413.

19. Wilson P.F. On correlating TEM cell and OATS emission measurements // IEEE Trans. on Electromag. Compat. – 1995. – Vol. 37, No. 1. – P. 1–16.

20. Wilson P.F. A review of dipole models for correlating emission measurements made at various EMC test facilities / P.F. Wilson, C.L. Holloway, G. Koepke // Int. Symp. on Electromag. Compat. – 2004. – P. 898–901.

21. Осинцев А.В. Метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера на основе

аппаратного подсчета контрольной суммы / А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2022. – № 1 (25). – С. 70–78.

22. Пат. RU 2 727 075 C1, МПК H01P 1/00. ТЕМ-камера для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем / Т.Р. Газизов (РФ), А.В. Демаков (РФ), М.Е. Комнатнов (РФ). – № 2019140183; заявл. 09.12.2019; опубл. 17.07.2020, Бюл. № 20. – 12 с.

Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, доцент каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-15, доб. 2561
Эл. почта: maxmek@mail.ru

Komnatnov M.E.

Technique for estimating the radiated emission of an integrated circuit in a TEM-cell under temperature exposure

The integrated circuits (IC) used in radioelectronic devices create electromagnetic radiation, the level of which is analyzed while ensuring electromagnetic compatibility. In real-world operating conditions, the radioelectronic devices are exposed to temperature, that affects the amplitudes and the frequencies of the radiated emission of the IC. This paper proposes a technique and an algorithm to measure the level of radiated emissions of IC at a given temperature. Using the technique, the levels of radiated emissions of the K1986VE91T microcontroller were measured in a frequency of 150 kHz – 1 GHz and the temperatures from –50 to +150 °C ranges. It is shown that at the main clocking frequency, around 80 MHz and the 2nd harmonic, the effect of temperature does not affect the level of radiated emission of the microcontroller and the change is no more than ± 0.3 dB. The operation of various microcontroller units with an increase in its temperature from minus 50 to +150 °C reduces by 5.5 dB the maximum level of radiated emission of the microcontroller in the frequency range of 8–27 MHz. The most temperature-dependent levels of radiated emission are observed up to the 6th harmonic of the clock frequency of the microcontroller and reach 35.8 dBμV, which is 5.7 dB higher than the measured level at normal temperature.

Keywords: electromagnetic compatibility, TEM-cell, radiated emissions, integrated circuit.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-30-36

References

1. GOST 30372–2017. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya*. [Electromagnetic compatibility of technical means. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 58 p. (in Russ.).

2. Ramdani M., Sicard E., Boyer A. et al. The electromagnetic compatibility of integrated circuits – Past, present, and future. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 78–100.

3. Mohajer-Iravani B., Ramahi O.M. Reactive power radiated from the planar electromagnetic bandgap structures, a source of EMI in high speed packages. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2011, pp. 1840–1843.

4. Song E., Park H.H. A component-level radio-frequency interference evaluation method for mobile devices. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 1358–1361.
5. Muccioli J.P., North T.M., Slattery K.P. Predicting module level RF emissions from IC emissions measurements using a 1 GHz TEM or GTEM cell – a review of related published technical papers. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2008, pp. 1–7.
6. Lin H.-N., Kuo C.-W., Cheh C.-K., et. al. Analysis of EMI effect on flash memory IC. *IEEE International Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, 2012, pp. 757–760.
7. *Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2*. First Ed., 2005. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication-on/6185>, free (Accessed: March 31, 2024).
8. *IEC 61000-4-20, Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-20: Testing and measurement techniques – emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides, 2022-02*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/34378> (Accessed: March 31, 2024).
9. Park H.H. Simple shielding evaluation method of small shield cans on printed circuit boards in mobile devices. *Electronics Letters*, 2013, pp. 936–938.
10. Demakov A.V., Semenjuk V.A., Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Research of radiated emissions of a microcontroller using various power supplies. *IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2021, pp. 1–4.
11. Demakov A.V., Osintsev A.V., Semenjuk V.A., Komnatnov M.E. Measurement of microcontroller radiated emissions at different operation modes. *IEEE International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 2021, pp. 193–197.
12. Boyer A., Dhia S. Low-Cost broadband electronic coupler for estimation of radiated emission of integrated circuits in TEM cell. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 636–639.
13. Zhang J., Fan J. Source reconstruction for IC radiated emissions based on magnitude-only near-field scanning. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 2, pp. 557–566.
14. Capriglione D., Chiariello A.G., Maffucci A. Accurate models for evaluating the direct conducted and radiated emissions from integrated circuits. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 477.
15. Parker W.H., Tustin W., Masone T. The case for combining EMC and environmental testing. *ITEM*, 2002, pp. 54–60.
16. Dhia S.B., Sicard E., Mequignon Y. et al. Thermal influence on 16-bits microcontroller emission. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2007, pp. 1–4.
17. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. On joint climatic and electromagnetic testing of radioelectronic equipment. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, vol. 34, no. 4, pp. 39–45 (in Russ.).
18. Dienot J.M., Batista E., Bernard M. Dual experimental approach for thermal impacts on electromagnetic behavior of electronic circuit board configurations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 57, no. 11, pp. 2405–2413.
19. Wilson P.F. On correlating TEM cell and OATS emission measurements. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 1995, vol. 37, no. 1, pp. 1–16.
20. Wilson P.F., Holloway C.L., Koepke G. A review of dipole models for correlating emission measurements made at various EMC test facilities. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2004, pp. 898–901.
21. Osintsev A.V., Komnatnov M.E. A method for detecting and correcting errors in memory circuits based on the calculation of the hash sum. *Proceedings of TUSUR University*, 2022, V. 25, no. 1, pp. 70–78 (in Russ.).
22. Demakov A.V., Komnatnov M.E., Gazizov T.R. *TEM-kamera dlya ocenki pomekhoemissii i pomek-houstojchivosti integral'nyh skhem* [TEM-cell for evaluation of radiated emission and noise immunity of integrated circuits]. Patent RF, no. 2727075, 2020.

Maxim E. Komnatnov

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor,
 Department of Television and Control, Tomsk State
 University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
 Phone: +7 (382-2) 70-15-15, ext. 2561
 Email: maxmek@mail.ru