

В.А. Семенюк, М.Е. Комнатнов, А.В. Демаков

Исследование излучаемой эмиссии микроконтроллеров при температурном воздействии

Представлены результаты исследования излучаемой эмиссии группы микроконтроллеров в диапазоне частот от 50 кГц до 1 ГГц при температурном воздействии. Выполнена сборка установки для измерения излучаемой эмиссии на основе климатической и ТЕМ-камер. Выполнены измерение и анализ эмиссии микроконтроллеров при изменении температуры в диапазоне от -50 до $+150$ °С.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, интегральная схема, микроконтроллер, излучаемая эмиссия, ТЕМ-камера.

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) используются во всех сферах современного общества. Совершенствование электронной компонентной базы (ЭКБ), применяемой при разработке различных РЭС, направлено на повышение быстродействия, уровня интеграции, а также снижение значений питающих напряжений. Увеличение рабочих частот и переход с микронных технологий производства на субмикронные [1] приводят к повышению восприимчивости ЭКБ [2, 3] к внешнему электромагнитному полю и увеличению амплитуд излучаемых эмиссий РЭС.

Активно исследуются подходы, направленные на уменьшение амплитуд излучаемых эмиссий от ИС. Использование поверхностно-монтажных корпусов ИС, таких как BGA [4], позволило снизить уровень излучаемых эмиссий за счёт минимизации длины выводов корпуса. Также известно применение радиопоглощающих материалов при корпусировании ИС для рассеяния эмиссии в тепло [5]. В то же время температура окружающей среды может оказывать влияние на рабочие характеристики ИС, в том числе на уровни излучаемой эмиссии и восприимчивости к помехам [6]. В связи с этим актуально проведение совместных испытаний ИС на климатические и электромагнитные воздействия [7, 8].

Целью данной работы является исследование влияния температурного воздействия на излучаемую эмиссию группы МК на базе ARM Cortex M3.

Описание экспериментальной установки

Для исследования температурного воздействия на излучаемые эмиссии группы МК на базе ядра Cortex M3 (K1986VE91T, K1986VE92Q1) собрана измерительная установка на основе ТЕМ-камеры [9], используемой для испытаний ИС согласно стандартам [10, 11]. ТЕМ-камера представляет собой устройство на основе линии передачи, конструкция которой состоит из регулярной части волновода с расположенным внутри центральным проводником, которая соединяется с СВЧ соединителями с помощью согласующих переходов. Для измерения излучаемой эмиссии ИС устанавливаются на измерительной печатной плате (ПП) и помещаются во внутренний объем камеры в её регулярной части [12]. Напряжение питания 5 В подается на измерительную ПП через соединитель USB от АКБ, после чего выполняется проверка корректности функционирования МК и выполняемой им

задачи [13]. С помощью измерительного приёмника (ИП) Rohde&Schwarz ESRP 7 выполнялось измерение напряжений на входе ТЕМ-камеры, характеризующее эмиссию от ИС. Для обеспечения температурного воздействия ТЕМ-камера с ИС помещалась в промышленную камеру тепло/холод «Espec SU-262» [14] (рис. 1).

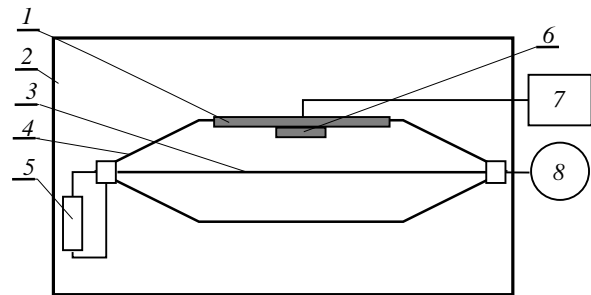


Рис. 1. Структурная схема установки для совместных климатических и электромагнитных испытаний ИС:

1 – ПП, 2 – камера тепло/холод, 3 – центральный проводник, 4 – ТЕМ-камера, 5 – согласованная нагрузка, 6 – МК, 7 – АКБ, 8 – ИП

Измерения эмиссий проводились в диапазоне частот от 50 кГц до 1 ГГц при воздействии температуры от -50 до $+150$ °С. Установка для совместных климатических и электромагнитных испытаний ИС приведена на рис. 2.

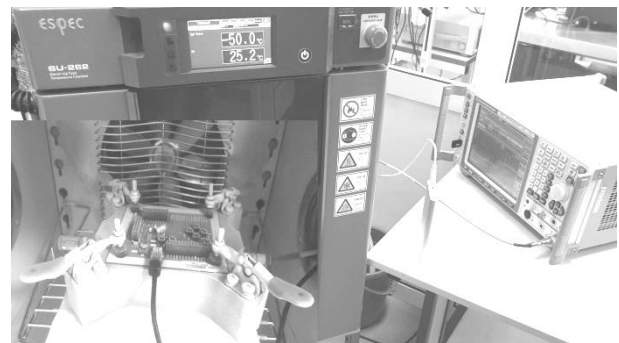


Рис. 2. Установка для совместных климатических и электромагнитных испытаний ИС в диапазоне температур от -50 до $+150$ °С

Для группы МК (рис. 3) разработана тестовая программа, выполняющая тактирование МК от внешнего тактового генератора на частоте 80 МГц, конфи-

гурацию портов ввода / вывода на выход в цифровом режиме и настройку таймеров в режим генерации ШИМ с частотой 50 кГц со скважностью 2, 4 и 8 по трём его каналам.

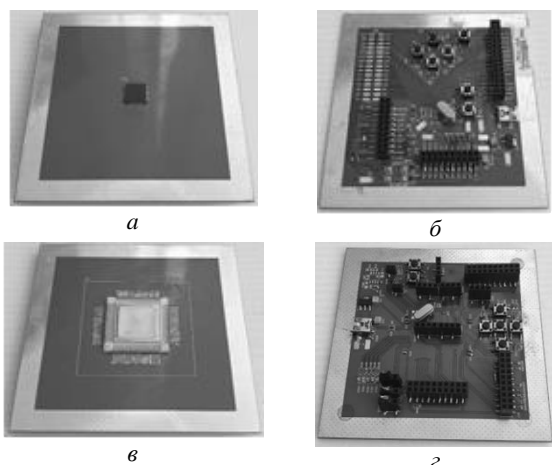


Рис. 3. Общий вид измерительных ПП с МК K1986BE92QI (а, б), K1986BE91T (в, г)

Измерение и анализ излучаемой эмиссии

Приведены измеренные частотные зависимости напряжения на входе ИП U при температурах -50 , $+20$ и $+150$ °C (рис. 4).

Максимальные значения эмиссий дополнительно сведены в табл. 1 и 2.

Из измеренных зависимостей U для МК K1986BE91T наблюдается увеличение значения U в диапазоне частот 9–28 МГц, что вызвано формированием ШИМ-сигналов (рис. 4, а).

Таблица 1

Максимальные значения U в диапазоне частот 0,15–32 МГц

МК	Температура, °C	Уровень U , дБ	Частота, МГц
K1986BE91T	-50	18,2	10
	+20	10,5	10
	+150	12,6	10
K1986BE92QI	-50	19,2	9
	+20	12,6	4
	+150	14,6	4

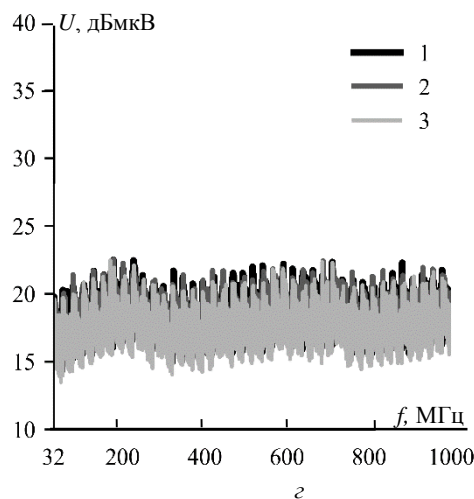
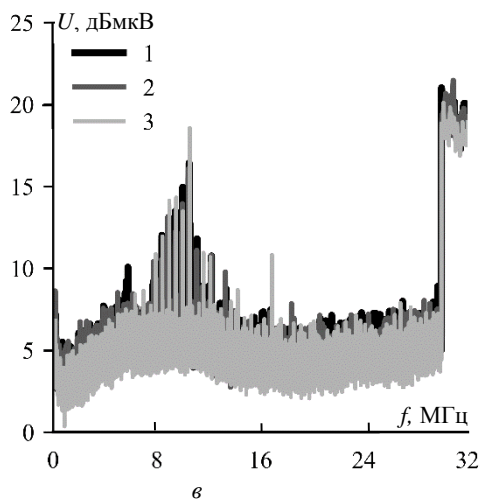
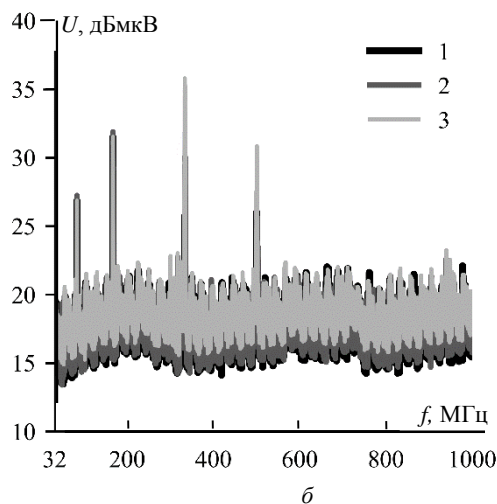
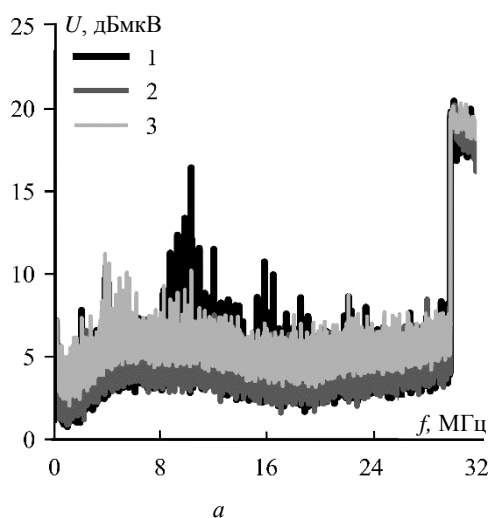


Рис. 4. Измеренные частотные зависимости U в диапазонах частот 0,15–32 МГц (а, в) и 32–1000 МГц (б, г) при функционировании МК K1986BE91T (а, б) и K1986BE92QI (в, г) при температуре: -50 °C (1), $+20$ °C (2) и $+150$ °C (3)

При температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ уровень U максимален и составляет 18,2 дБ вблизи 10 МГц, а увеличение температуры до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению U до 12,6 дБ (см. табл. 1).

Увеличение напряжения на 20 дБ на частотах выше 30 МГц вызвано работой преселектора ИП. В диапазоне частот 32–1000 МГц наблюдается увеличение U до 26–36 дБ вблизи частоты тактирования МК 80 МГц и кратных ей гармоник (160, 334, 495 МГц) (см. рис. 4, б). Видно, что существенное различие уровня излучаемой эмиссии наблюдается на частотах 4-й и 5-й гармоник тактовой частоты МК. Увеличение температуры от -50 до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к уменьшению U с 36 до 31,5 дБ вблизи 334 МГц и уменьшению уровня напряжений 30 до 26,4 дБ вблизи 495 МГц. При увеличении температуры до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается снижение U с 31,5 до 27,4 дБ вблизи 334 МГц и с 26,4 до 23,5 дБ вблизи 495 МГц (см. табл. 2).

Таблица 2

**Максимальные значения U
в диапазоне частот 32–1000 МГц**

МК	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Уровень U , дБ	Частота, МГц
K1986VE91T	-50	36	336
	$+20$	31,5	334
	$+150$	27,4	334
K1986VE92QI	-50	24	160
	$+20$	23	160
	$+150$	23	724

Из полученных зависимостей U для МК K1986VE92QI в диапазоне 0,15–32 МГц (см. рис. 4, в) видно увеличение амплитуды максимальной излучаемой эмиссии вблизи частоты 10 МГц на 10–15 дБ. Это также наблюдалось в результатах измерений первого МК и объясняется работой блока формирования ШИМ-сигналов. При температуре минус $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на частоте 10 МГц наблюдается максимальное значение $U = 19,2$ дБ, однако с ростом температуры до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение U снижается до 14,6 дБ. Спектр эмиссии данного МК сосредоточен в диапазоне частот 8–12 МГц, причем максимальное значение U варьируется в пределах 8–19 дБ во всем диапазоне температур. На частотах 16–32 МГц эмиссии сопоставимы по уровню с шумом на входе ИП. Из рис. 4, г видно, что изменение температуры не оказывает существенного влияния на уровень U в диапазоне частот 32–1000 МГц, при этом максимальное значение U составляет 24 дБ вблизи частоты 160 МГц (см. табл. 2).

Заключение

Представлены результаты измерений излучаемой эмиссии группы МК на базе ядра Cortex M3 в диапазоне частот от 50 кГц до 1 ГГц при изменении температуры от -50 до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выявлено, что для МК K1986VE91T увеличение эмиссии в диапазоне частот 9–28 МГц вызвано формированием ШИМ-сигналов, а также работой блока тактирования МК. При изменении температуры от -50 до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение U в диапазоне частот 9–28 МГц снижается с 18,2 до 12,6 дБ, а вблизи частоты 334 МГц – уменьша-

ется с 36 до 27,4 дБ. Для МК K1986VE92QI наблюдается схожий характер частотных зависимостей эмиссии в диапазоне частот 50 кГц – 30 МГц с максимальным значением $U = 19,2$ дБ. Показано, что на частотах выше 30 МГц изменение температуры не оказывает существенного влияния на уровень эмиссии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162) в ТУСУРе.

Литература

1. Theis T.N. The end of Moore's law: a new beginning for information technology / T.N. Theis, H.-S.C. Wong // Computing in science and engineering. – 2017. – Vol. 19, No. 2. – P. 41–50.
2. Ключник А.В. Методические аспекты исследования стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения / А.В. Ключник, Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug10/3/text.html> (дата обращения: 5.09.2021).
3. Пирогов Ю.А. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.html#6> (дата обращения: 5.09.2021).
4. Tu M.-H. Electromagnetic interference measurement study in BGA package / M.-H. Tu, R.-F. Hsu, S.-M. Wu, C.-C. Chen // Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – 2015. – P. 219–222.
5. Piersanti S. Near field shielding performances of absorbing materials for integrated circuits (IC) applications, part I: lateral excitation / S. Piersanti, A. Orlandi, F. Paulis, S. Connor, M.A. Khorrami, C. Dixon, B. Archambeault, J.L. Drewniak // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 60, No. 1. – P. 188–195.
6. Dienot J., Batista E., Ramos I. Thermal-electromagnetic susceptibility behaviors of PWM patterns used in control electronic circuit // 2015 10th International workshop on the electromagnetic compatibility of integrated circuits (EMC Compo). – IEEE, 2015. – P. 190–195.
7. 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. – P. 2405–2413.
8. Dhia S.B. et al. Thermal influence on 16-bits microcontroller emission // 2007 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – IEEE, 2007. – P. 1–4.
9. Патент на изобретение № 2727075. ТЕМ-камера для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем / Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. // Заявка № 2019140183. Приоритет изобретения 09.12.2019. Опубл. 17.07.2020. Бюл. № 20.
10. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2, First Edition, 2010. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6508> (дата обращения: 05.09.2020).
11. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edition, 2005. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6185> (дата обращения: 05.09.2020).

12. Демаков А.В. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость // А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов / Доклады ТУСУР. – 2018. – № 1 (21). – С. 52–56.

13. 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 // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2021. – P. 1–4.

14. Bench-Top Type Temperature (& Humidity) Chamber. URL: <https://www.espec.de/products/compact/bench-top-type-temperature-humidity-chamber/> (дата обращения: 01.10.2021).

Семенюк Валерий Александрович
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: valera_student@cloud.com

Комнатнов Максим Евгеньевич
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: maxmek@mail.ru

Демаков Александр Витальевич
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: vandervals@inbox.ru