

Методика оценки помехоустойчивости микроконтроллеров к электромагнитному воздействию в ТЕМ-камере

В. А. Семенюк[✉], М. Е. Комнатнов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

[✉] valerii.a.semeniuk@tusur.ru

Аннотация

Введение. Традиционные подходы к оценке помехоустойчивости интегральных схем (ИС) сфокусированы на анализе сигналов, создаваемых на их выводах. Подобный подход не позволяет учесть возможное нарушение работы внутренних функциональных блоков ИС типа микроконтроллер (МК). В условиях эксплуатации МК подвергается воздействию внешних электромагнитных помех (ЭМП), способных нарушить его работу за счет изменения данных в памяти МК, что повышает риск отказа устройства в целом. Поэтому актуальна разработка новых методик для оценки помехоустойчивости МК, позволяющих локализовать места, уязвимые к воздействию ЭМП.

Цель работы. Разработка методики для комплексной оценки помехоустойчивости МК, включающей анализ генерируемых сигналов МК и оценку корректности работы его электрически стираемого программируемого постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) при воздействии ЭМП в ТЕМ-камере.

Материалы и методы. Описаны методика оценки помехоустойчивости МК к воздействию ЭМП в ТЕМ-камере, включающая анализ генерируемых сигналов на выводах МК, и алгоритм проверки целостности данных в ПЗУ. Методика позволяет локализовать изменения в памяти МК с использованием алгоритма проверки контрольных сумм.

Результаты. Экспериментальная оценка помехоустойчивости сигналов на выводах ИС показала отклонения амплитуды, фазы и частоты сигнала с широтно-импульсной модуляцией в 33, 35 и 93 % относительно исходных значений. Зафиксированы изменения в памяти МК при тактовой частоте 72 МГц и внешнем воздействии с уровнем 25 дБм на частотах 72 и 144 МГц. На частоте 72 МГц зарегистрировано изменение 40 % адресного пространства основной программы, при этом данные, записанные в ПЗУ, остались неизменными. Воздействие на частоте 144 МГц привело к изменению 42.68 % адресного пространства основной программы и практически полному стиранию записанных данных в ПЗУ. Установлено, что большинство изменений в ПЗУ наблюдается на основной и кратной ей частотах тактирования МК.

Заключение. Предложенная методика может быть эффективно использована при оценке помехоустойчивости различных МК в ТЕМ-камере.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, ТЕМ-камера, помехоустойчивость, микроконтроллер, постоянное запоминающее устройство

Для цитирования: Семенюк В. А., Комнатнов М. Е. Методика оценки помехоустойчивости микроконтроллеров к электромагнитному воздействию в ТЕМ-камере // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 6. С. 80–89.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-80-89

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: Исследование поддержано Российским научным фондом (проект №23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>).

Статья поступила в редакцию 23.05.2025; принята к публикации после рецензирования 09.10.2025; опубликована онлайн 29.12.2025

Methodology for Evaluating Microcontroller Susceptibility to Electromagnetic Influence in TEM Cell

Valerii A. Semeniuk[✉], Maxim E. Komnatnov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

[✉] valerii.a.semeniuk@tusur.ru

Abstract

Introduction. Conventional approaches to evaluating the electromagnetic interference (EMI) immunity of integrated circuits (ICs) focus on analyzing signals generated at their outputs. However, such methods fail to account for potential malfunctions in internal functional blocks, such as microcontrollers (MCUs). During operation, MCUs are exposed to external EMI, which can disrupt their functionality by altering data stored in their flash-memory, thereby increasing the risk of overall device failure. Consequently, there is a critical need to develop new methodologies for assessing MCU susceptibility and identifying EMI-vulnerable flash-memory locations.

Aim. To develop a comprehensive methodology for evaluating MCU susceptibility, encompassing analysis of generated signals and verification of flash-memory data integrity under EMI exposure in a TEM cell.

Materials and methods. A methodology for assessing MCU susceptibility in a TEM cell is described, including analysis of output signals and a data integrity verification algorithm for flash-memory. The approach localizes memory alterations using a checksum verification procedure.

Results. Experimental evaluation of IC signal susceptibility revealed deviations in the amplitude of the pulse-width modulated (PWM) signals, phase, and frequency of 33, 35, and 93 %, respectively, relative to baseline values. Flash-memory data corruption was observed at a clock frequency of 72 MHz under external EMI at 25 dBm (72 and 144 MHz). At 72 MHz, 40 % of the address space of the main program was modified, although the flash-memory retained its stored data. Exposure at 144 MHz altered 42.68 % of the address space and caused near-complete erasure of flash-memory data. Most flash-memory modifications occurred at the MCU's fundamental clock frequency and its harmonics.

Conclusion. The proposed TEM cell-based methodology for MCU susceptibility assessment, including flash-memory integrity testing, can be effectively applied to evaluate diverse MCUs.

Keywords: electromagnetic compatibility, TEM cell, susceptibility, microcontroller, flash-memory

For citation: Semeniuk V. A., Komnatnov M. E. Methodology for Evaluating Microcontroller Susceptibility to Electromagnetic Influence in TEM Cell. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 6, pp. 80–89.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-80-89

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The research was supported by the Russian Science Foundation (project №23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>) at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Submitted 23.05.2025; accepted 09.10.2025; published online 29.12.2025

Введение. Исследования устойчивости интегральных схем (ИС) к воздействию электромагнитных помех (ЭМП) направлены на повышение их надежности и отказоустойчивости в полях мощного электромагнитного излучения (ЭМИ) [1, 2]. Один из распространенных видов ИС – микроконтроллеры (МК), содержащие постоянное (ПЗУ) и оперативное (ОЗУ) запоминающие устройства, подверженные изменению данных под воздействием ЭМП [3, 4]. Также МК включают аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразо-

ватели, арифметико-логическое устройство (АЛУ) и прочие блоки, корректность функционирования которых может быть нарушена при воздействии ЭМП [5, 6]. Для оценки помехоустойчивости МК применяют разные методы, включая метод ТЕМ-камеры [7–9]. Данный метод позволяет создать в объеме ТЕМ-камеры однородное электромагнитное поле с заданными характеристиками частоты и амплитуды. Это обеспечивает воспроизводимое воздействие на корпус и выводы ИС, минимизируя влияние внешних ЭМП.

При оценке помехоустойчивости МК выделяют 2 вида отказов – необратимые и обратимые [10]. Последние сложнее распознаются, диагностируются и локализируются в местах сбоя, поскольку эффект оказывается кратковременным и устраняется в результате сброса или обновления состояния регистров МК. Также обратимые отказы могут проявляться в изменении регистров МК, относящихся как к блокам периферии, так и к ПЗУ. Это в свою очередь может привести к непредсказуемому поведению МК в процессе работы [11, 12]. Необратимые отказы, вызванные деградационными изменениями МК, не устраняются сбросом или иными программными средствами. Традиционные подходы к оценке помехоустойчивости МК сфокусированы на анализе сигналов, генерируемых на выводах ИС [13, 14]. Это не позволяет учитывать возможное нарушение работы внутренних устройств, например ПЗУ и ОЗУ. Воздействие внешних ЭМП способствует изменению данных в памяти МК [15], что повышает риск возникновения битовых ошибок и, как следствие, приводит к нестабильной работе МК.

В связи с этим актуальна разработка новых методик для анализа помехоустойчивости МК, позволяющих локализовать места, уязвимые к воздействию ЭМП.

Цель описываемой работы – разработка методики для комплексной оценки помехоустойчивости МК, включающей анализ генерируемых сигналов на выводах ИС и оценку корректности работы ПЗУ при воздействии ЭМП в ТЕМ-камере.

Методика оценки помехоустойчивости. Разработана методика оценки помехоустойчивости МК, отличающаяся комплексным анализом, включающим оценку генерируемых сигналов МК и анализ состояния ПЗУ до и после воздействия ЭМП в ТЕМ-камере. Оценка по-

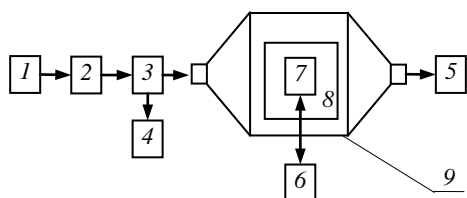


Рис. 1. Схема измерительной установки для оценки восприимчивости к радиоизлучению МК в ТЕМ-камере [9]

Fig. 1. Diagram of a measurement setup for evaluating radiated susceptibility of the MCU in a TEM cell [9]

мехоустойчивости проводится по схеме из [9] (рис. 1), содержащей генератор высокочастотных сигналов 1, усилитель мощности 2, направленный ответвитель 3, измеритель мощности 4, согласованную нагрузку 5 и устройство мониторинга 6 параметров ИС 7, расположенной на специальной измерительной печатной плате (ПП) 8 в апертуре ТЕМ-камеры 9.

На основе [9] разработана методика оценки помехоустойчивости, включающая следующие этапы:

1. Сборку измерительной установки по схеме (рис. 1).
2. Размещение в апертуре ТЕМ-камеры измерительной ПП с ИС.
3. Анализ работоспособности ИС посредством мониторинга.
4. Выбор типа, частоты и амплитуды воздействия ЭМП на ИС как для непрерывного, так и импульсного сигналов:

4.1. Для непрерывного воздействия:

4.1.1. Используется амплитудная модуляция (АМ) с частотой $F_{AM} = 1$ кГц и глубиной $M = 80\%$.

4.1.2. Изменяется частота несущей с шагом не более 1% в пределах заданного диапазона (от 150 до 1 ГГц) согласно [15] от минимального до максимального значения.

4.2. Для импульсного воздействия:

4.2.1. Используется импульсная модуляция (длительность импульса $\tau_i = 50$ мкс; $F_{AM} = 1$ кГц, $M = 80\%$) сигнала.

4.2.2. Изменяется частота повторения импульсов с 1 на 200 Гц.

4.3. Увеличивается амплитуда на входе ТЕМ-камеры до значения, при котором ухудшается качество функционирования ИС.

5. Регистрацию ухудшения качества функционирования ИС при заданной амплитуде ЭМП.

По окончании воздействия и при возникновении отказа ИС он анализируется и классифицируется на обратимый или необратимый. Оцениваются количество и тип неисправностей, а также ухудшение характеристик ИС, определяемых в соответствии с технической документацией от производителя, по достижению одного из следующих результатов:

1. Соблюдается нормальная работа в пределах, указанных в технической документации.

2. Наблюдается обратимый отказ без вмешательства оператора, характеризующийся кратковременным нарушением работоспособности ИС, с последующим восстановлением до нормальной работы после завершения воздействия.

3. Выявлен обратимый отказ с вмешательством оператора, при котором серьезно нарушена работоспособность. Характеризуется аналогичным кратковременным нарушением работоспособности ИС, восстанавливающейся до нормальной только после вмешательства оператора, например для перепрограммируемых ИС, требующих сброса или обновления программного обеспечения (ПО).

4. Наблюдается необратимый отказ, при котором полностью нарушена работоспособность перепрограммируемой ИС из-за возможного повреждения ПО или потери данных в ПЗУ, требующий вмешательства оператора для замены ПО.

5. Наблюдается необратимый отказ, при котором полностью нарушена работоспособность ИС из-за повреждения ее аппаратной части.

Для обнаружения изменений в работе МК разработан алгоритм (рис. 2) диагностики ПЗУ при воздействии внешних ЭМП. Он позволяет унифицировать процедуру испытания МК при различных его конфигурациях, а также выявить изменения в регистрах памяти. Для оценки изменений в ПЗУ используется сравнение контрольных сумм (КС) до и после воздействия. В случае их несовпадения выполняется анализ изменений в ПЗУ. Алгоритм может быть применен при оценке помехоустойчивости различных программируемых ИС.

Основная задача алгоритма – сравнение вычисленных значений с эталонными. На первом шаге выполняется инициализация МК, а именно проводится настройка его функциональных блоков, необходимых для выполнения тестовой задачи. При этом тактирование остальных незадействованных блоков отключается. Затем, посредством отладочного порта, выполняется считывание адресного пространства МК. Далее эталонные значения загружаются в ПЗУ, после чего МК готов к проведению испытаний на помехоустойчивость. Во время выполнения тестовой задачи информация, включающая различные параметры (частоту тактирования, напряжение, число тактов и ре-

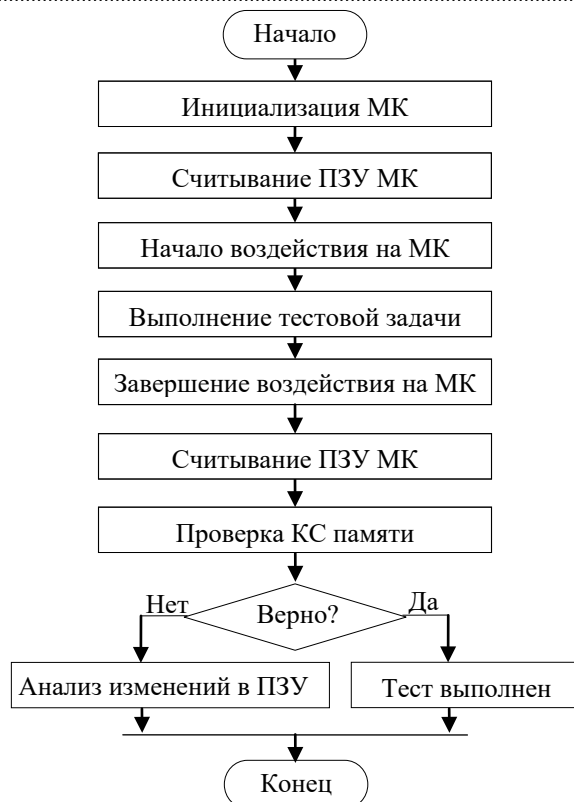


Рис. 2. Алгоритм оценки ПЗУ МК до и после воздействия ЭМИ

Fig. 2. Algorithm for evaluating the MCU flash memory before and after EMI influence

зультат проверки) МК, поступает на средство мониторинга. После выполнения тестовой задачи воздействие на МК прекращается и считанные средством мониторинга данные адресного пространства сравниваются с записанными до воздействия. В случае несовпадения выполняется анализ зафиксированных различий с локализацией изменений.

Оценка помехоустойчивости МК. По разработанной методике оценена помехоустойчивость МК. Для этого ИС устанавливалась на четырехслойную измерительную ПП размерами 100×100 мм. Конструктивно она имеет со стороны размещения ИС (рис. 3) сплошной полигон "земли" для экранирования от внешних ЭМП и минимальной неравномерности поперечной составляющей E -поля, воздействующего на ИС. С другой стороны ПП располагались элементы и периферийные устройства для работы МК, соединенные с ним через сквозные металлизированные отверстия под корпусом. Края ПП выполнены в виде сплошных полигонов "земли" (без паяльной маски) для электрического контакта с корпусом ТЕМ-камеры.

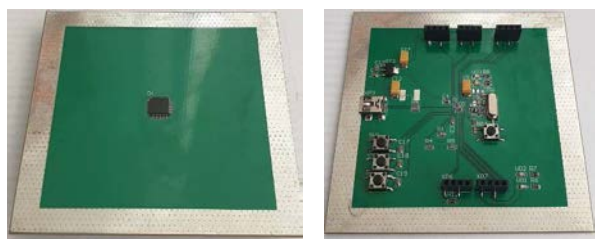


Рис. 3. Измерительная ПП: со стороны МК STM32F103C8T6 (а) и компонентов (б)

Fig. 3. Measurement printed circuit board: STM32F103C8T6 MCU side (a) and components side (b)

Валидация предложенного алгоритма (см. рис. 2) осуществлялась с использованием разработанной тестовой задачи, задействовавшей периферийные модули МК: порты ввода/вывода, таймеры, интерфейс универсального асинхронного приемопередатчика (УАПП) и ПЗУ. Основная функция тестовой задачи – проверка целостности данных, хранящихся в памяти МК. Алгоритм тестовой задачи выполняет предварительный расчет КС тестовых задач, например при вычислении факториала, которые сохраняются в ОЗУ. После вычисления МК сравнивает полученные КС с эталонными, заранее записанными в память, и отправляет результат на средство мониторинга, которое проводит завершающий этап оценки. Для оценки помехоустойчивости портов ввода/вывода таймеры МК настроены на генерацию сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с частотой 50 кГц. Частота тактирования МК (f_c) выбрана 72 МГц с использованием блока фазовой автоподстройки частоты, использующего внешний кварцевый резонатор.

Оценка помехоустойчивости к непрерывному воздействию в виде АМ-сигнала проведена с использованием установки (рис. 4), со-

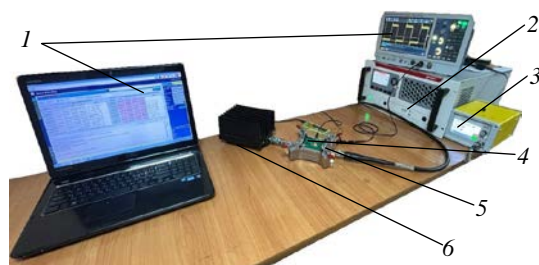


Рис. 4. Измерительная установка для оценки помехоустойчивости ИС к непрерывному воздействию

Fig. 4. Measurement setup for evaluating susceptibility of IC immunity to continuous wave influence

бранной по схеме на рис. 1, содержащей средства мониторинга ИС 1, усилитель мощности с встроенным направленным ответвителем и измерителем мощности 2, генератор сигналов 3, измерительную ПП с ИС 4 и малогабаритную ТЕМ-камеру 5 с согласованной нагрузкой 6. Малогабаритная ТЕМ-камера [16, 17] позволяет создавать электрическое поле с напряженностью не менее 5 кВ/м и неравномерностью амплитуды ± 2.5 дБ при подводимой входной мощности 150 Вт в диапазоне частот до 5 ГГц.

Средствами мониторинга параметров МК являлись персональный компьютер (ПК) и осциллограф. Результаты выполнения тестовых задач передавались на ПК через УАПП. Также ПК использовался для автоматизированного контроля измерительных приборов. Это позволяло задавать время воздействия и выполнять оценку работоспособности исследуемого МК. С помощью специальной функции осциллографа отклонения сигналов с выводов ИС от эталонных сохранялись в его памяти для последующей обработки и анализа. Оценка помехоустойчивости выполнялась в диапазоне частот 1...1000 МГц с шагом не более 1 % и при изменении мощности $P_{\text{вх}}$, подводимой к ТЕМ-камере на каждой частоте, от -25 до 53 дБм.

Используя разработанную методику и алгоритм (см. рис. 2), а также собранную установку (рис. 4), оценены уровни помехоустойчивости МК STM32F103C8T6 к импульсному и непрерывному воздействиям. Зафиксированы изменения в форме ШИМ-сигнала (рис. 5) при воздействии на МК: непрерывного синусоидального сигнала с АМ (частота модулирующего сигнала $F_{\text{АМ}} = 1$ кГц; частота несущей $f_{\text{АМ}} = 72$ МГц; глубина модуляции $M = 80$ %; мощность сигнала $P_{\text{вх}} = 25$ дБм): амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) (длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 50$ мкс; $F_{\text{АМ}} = 1$ кГц; $f_{\text{АМ}} = 72$ МГц; $M = 80$ %; $P_{\text{вх}} = 25$ дБм) и АИМ с программным прерыванием (длительность сигнала $\tau_{\text{с}} = 50$ мкс; $F_{\text{АМ}} = 1$ кГц; $f_{\text{АМ}} = 72$ МГц; $M = 80$ %; $P_{\text{вх}} = 53$ дБм).

При воздействии непрерывным сигналом с АМ (рис. 5, б) наблюдалось снижение амплитуды $U_{\text{ШИМ}}$ на 0.8 В (с 3.3 до 2.5 В) без изменения фазы сигнала. Воздействие сигналом с

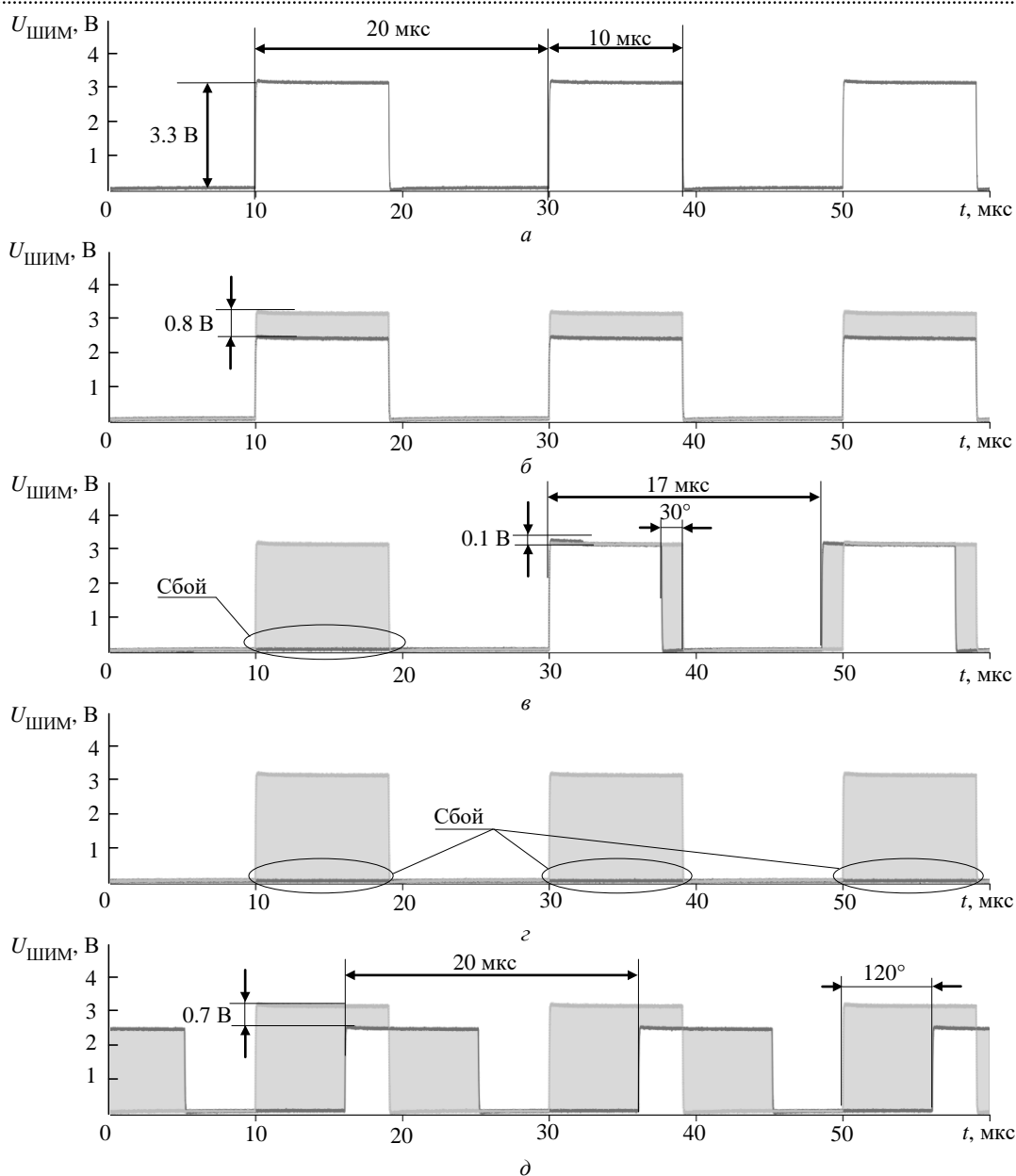


Рис. 5. Осциллограммы ШИМ-сигналов МК: без воздействия (а) и с ним при АМ (б), АИМ (в) и АИМ с программным прерыванием (г, д) сигналами, наложенными на маску сигнала (■) без воздействия
 Fig. 5. Oscillograms of MCU PWM signals: without interference (a) and with interference from AM (б), AIM (в) and AIM with software interrupt (г, д) signals, overlaid on the signal mask (■) without interference

АИМ (рис. 5, в) вызвало критический сбой МК, приведший к его перезагрузке, с последующим кратковременным (3 мкс) увеличением амплитуды $U_{\text{ШИМ}}$ на 0.1 В при запуске и с фазовым сдвигом сигнала на 30° . При воздействии сигнала с АИМ и программным прерыванием (рис. 5, г) наблюдался сбой в работе МК с отсутствием ШИМ-сигнала на выходе. При таком же типе воздействия (рис. 5, д) зафиксировано снижение амплитуды $U_{\text{ШИМ}}$ на 0.7 В (до 2.6 В) и значительный фазовый сдвиг на 120° , что

привело к существенному влиянию сигнала воздействия с АИМ при аналогичной мощности (53 дБм) на параметры ШИМ-сигнала и общую стабильность работы МК.

На основе измеренных параметров ШИМ-сигнала ($U_{\text{ШИМ}}$, $f_{\text{ШИМ}}$, $\Phi_{\text{ШИМ}}$) вычислены стандартное и максимальное абсолютное отклонения его основных характеристик (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что амплитуда и частота ШИМ-сигнала значительно изменяются под воздействием внешнего ЭМП. Подобное воздействие

Табл. 1. Статистические показатели изменений ШИМ-сигнала

Tab. 1. Statistical indicators of PWM signal changes

Стандартное отклонение	$U_{\text{ШИМ}}, \%$ 32.47	$f_{\text{ШИМ}}, \%$ 92.95	$\Phi_{\text{ШИМ}}, \%$ 35.31
Максимальное абсолютное отклонение	97.05	322.74	62.67

может привести к нарушению работы узлов устройства, управляемых ШИМ-сигналами. Выявлено, что изменение параметров ШИМ-сигнала преимущественно наблюдается на частотах тактирования МК, в то время как на остальных частотах подобные изменения не зафиксированы.

Одновременно с отслеживанием состояния ШИМ-сигнала согласно предложенному алгоритму сравнивались адресные пространства МК на наличие ошибок. Так, при воздействии сигнала с АМ для тестовой задачи с $f_c = 72$ МГц зафиксирован программный сбой. При этом изменились данные в области памяти с основной программой (рис. 6). Записанные в ПЗУ эталонные значения не изменились. Данный сбой может изменить работу устройства с МК в целом, но основные данные в ПЗУ утеряны не будут.

Повышение частоты несущей АМ-сигнала ($F_{\text{АМ}} = 1$ кГц; $f_{\text{АМ}} = 144$ МГц; $M = 80 \%$; $P_{\text{вх}} = 25$ дБм) привело к изменению в адресном пространстве основной программы (рис. 7) на 42.68 и 98 % (стирание записанных в ПЗУ эталонных значений). В результате при данном воздействии наблюдалась полная потеря данных, записанных в ПЗУ МК. Это может вызвать во время выполнения основной программы МК необратимый

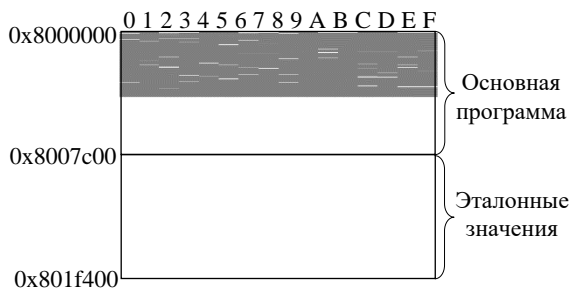


Рис. 6. Фрагменты адресного пространства ПЗУ МК с отличающимися значениями (■) от эталонных при воздействии АМ-сигнала с $F_{\text{АМ}} = 1$ кГц; $f_{\text{АМ}} = 72$ МГц; $M = 80 \%$; $P_{\text{вх}} = 25$ дБм

Fig. 6. Fragments of the MCU flash address space showing differing values (■) from reference, after the influence of an AM signal with $F_{\text{АМ}} = 1$ kHz; $f_{\text{АМ}} = 72$ MHz; $M = 80 \%$; $P_{\text{вх}} = 25$ dBm



Рис. 7. Фрагменты адресного пространства ПЗУ МК с отличающимися значениями (■) от эталонных при воздействии АМ-сигнала с $F_{\text{АМ}} = 1$ кГц; $f_{\text{АМ}} = 144$ МГц; $M = 80 \%$; $P_{\text{вх}} = 25$ дБм

Fig. 7. Fragments of the MCU flash address space showing differing values (■) from reference, after the influence of an AM signal with $F_{\text{АМ}} = 1$ kHz; $f_{\text{АМ}} = 144$ MHz; $M = 80 \%$; $P_{\text{вх}} = 25$ dBm

Табл. 2. Показатели изменений в ПЗУ МК

Tab. 2. Indicators of changes in MCU flash memory

f_c , МГц	Основная память, бит	ПЗУ, бит	Число ошибок, бит
144	17 016	33 726	50 742
72	15 947	0	15 947

отказ, требующий вмешательства оператора для восстановления данных.

Рассчитано количество изменений, зарегистрированных в ходе сбоя при $P_{\text{вх}} = 25$ дБм (табл. 2). Анализ полученных сбоя показывает, что при воздействии на частоте второй гармоники $f_c = 144$ МГц МК возможна потеря данных, сохраняемых в ПЗУ, что может привести к полной утрате данных, хранящихся в ПЗУ.

Полученные результаты свидетельствуют о схожем характере уязвимости МК к воздействию внешних ЭМП, аналогично наблюдаемому для ШИМ-сигнала. При этом большинство изменений зафиксировано на тактовой частоте f_c и ее второй гармонике. Ошибки в основной программе МК наблюдались при воздействии на частотах 72 и 144 МГц с АМ. При этом на частоте 144 МГц наблюдались изменения в адресном пространстве основной программы и в области с записанными эталонными значениями. Такие сбои могут вызвать не только потерю критически важных данных, но и непредсказуемую работу устройства, содержащего данный МК, при условии, что уровень сигнала воздействия остается неизменным.

Заключение. Представлены методика и алгоритм для оценки помехоустойчивости МК в ТЕМ-камере для комплексной оценки помехоустойчивости микроконтроллеров к электромагнитному воздействию в ТЕМ-камере
 Methodology for Evaluating Microcontroller Susceptibility to Electromagnetic Influence in TEM Cell

устойчивости, включающей оценку генерируемых сигналов на выводах ИС, а также анализ состояния ПЗУ до и после воздействия внешних ЭМП. Для валидации методики и алгоритма проводились воздействия АМ- и АИМ-сигналами на входе ТЕМ-камеры в диапазоне частот 1...1000 МГц, мощностью от –25 до 53 дБм. Полученные результаты демонстрируют, что, несмотря на относительную стабильность скважности ШИМ-сигнала, его амплитуда и частота подвергаются значительным изменениям под воздействием внешних ЭМП. Это может привести к нарушению корректной работы устройства с МК. Анализ результатов из-

менения данных в ПЗУ свидетельствует о схожем характере уязвимости МК к воздействию внешних ЭМП, аналогично наблюдаемому для ШИМ-сигнала. При этом большинство изменений регистрируется на тактовой частоте и на ее второй гармонике. Ошибки в основной программе МК зафиксированы при воздействии на частотах 72 и 144 МГц с АМ. Также воздействие на частоте 144 МГц приводило к изменению в адресном пространстве эталонных значений и вызывало не только потерю критически важных данных, но и непредсказуемое функционирование устройства при условии неизменного уровня сигнала воздействия.

Список литературы

1. Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Методические аспекты исследования стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 8. С. 1–27. URL: <http://jre.cplire.ru/win/aug10/3/text.html> (дата обращения: 23.05.2025)
2. Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 6. С. 1–38. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.html> (дата обращения: 23.05.2025)
3. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти / Л. Н. Ахрамович, М. П. Грибский, Е. В. Григорьев, С. А. Зуев, В. В. Старостенко, Г. И. Чурюмов // Радиоэлектроника и информатика. 2006. № 4. С. 15–17.
4. Analysis of EMI effect on flash memory IC / H.-N. Lin, C.-W. Kuo, C.-K. Chen, J.-S. Chen // Asia-Pacific Symp. on Electromagnetic Compatibility, Singapore, 21–24 May 2012. IEEE, 2012. P. 757–760. doi: 10.1109/APEMC.2012.6237824
5. Воздействие импульсных электромагнитных полей на микросхемы АЦП и ЦАП / М. П. Грибский, Е. В. Григорьев, В. В. Старостенко, Е. П. Таран, Д. А. Унжаков // Радиоэлектроника и информатика. 2007. № 4. С. 22–24.
6. Investigation on the immunity of microcontroller to electrical fast transients / C. Li, J. Li, J. Wu, Y. Xiao // IEEE 11th Intern. Conf. ASIC (ASICON), Chengdu, China, 03–06 Nov. 2015. IEEE, 2015. P. 1–4. doi: 10.1109/ASICON.2015.7517086
7. Nicolae P.-M., Nicolae I.-D., Stănescu D.-G. Using GTEM cells for immunity tests on electronic boards with microcontroller // IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Pittsburgh, USA, 06–10 Aug. 2012. IEEE, 2012. P. 44–49. doi: 10.1109/IEMC.2012.6351752
8. Industry Council on ESD Target Levels. White paper 3: System Level ESD Part I: Common Misconceptions and Recommended Basic Approaches. URL: <https://esdindustrycouncil.org/ic/en/documents/white-paper-3-system-level-esd-part-i-common-misconceptions> (дата обращения: 02.02.2025).
9. ГОСТ Р 51048–97. Совместимость технических средств электромагнитная. Генераторы электромагнитного поля с ТЕМ-камерами. Технические требования и методы испытаний. 12 с. URL: <http://electro-control.ru/images/standarts/51048-97.pdf> (дата обращения: 02.02.2025).
10. Gao H., Cui L. Reliability Analysis for a Degradation System Subject to Dependent Soft and Hard Failure Processes // IEEE Intern. Conf. on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), Prague, Czech Republic, 25–29 July 2017. IEEE, 2017. P. 165–170. doi: 10.1109/QRS-C.2017.33
11. Systematic design technique for improvements of mobile phone's immunity to electrostatic discharge soft failures / K. H. Kim, J.-H. Koo, B.-G. Kang, S. Kwon, Y. Kim, J. Jeong // IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Fort Lauderdale, USA, 25–30 July 2010. IEEE, 2010. P. 348–353. doi: 10.1109/IEMC.2010.5711299
12. Investigation of Electrostatic Discharge-Induced Soft-Failure Using 3D Robotic Scanning / O. H. Izadi, D. Pommerenke, H. Shumiya, K. Araki // IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI), New Orleans, USA, 22–26 July 2019. IEEE, 2019. P. 173–177. doi: 10.1109/IEMC.2019.8825248
13. Dienot J., Batista E., Ramos I. Thermal-electromagnetic susceptibility behaviors of PWM patterns used in control electronic circuit // 10th Intern. Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), Edinburgh, UK, 10–13 Nov. 2015. IEEE, 2015. P. 190–195. doi: 10.1109/EMCCompo.2015.7358355
14. New Test Method for the Pulse Immunity of Microcontrollers / T. Su, M. Unger, T. Steinecke, R. Weigel // IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility,

Honolulu, USA, 09–13 July 2007. IEEE, 2007. P. 1–6.
doi: 10.1109/ISEMC.2007.12

15. Using Error-Source Switching (ESS) Concept to Analyze the Conducted Radio Frequency Electromagnetic Immunity of Microcontrollers / T. Su, M. Unger, T. Steinecke, R. Weigel // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2012. Vol. 54, № 3. P. 634–645.
doi: 10.1109/TEMC.2011.2165341

16. Demakov A. V., Komnatnov M. E. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits // Intern. Mul-

ti-Conf. on Eng., Comp. and Inf. Sci. (SIBIRCON), Novosibirsk, Russia, 18–22 Sept. 2017. IEEE, 2017. P. 399–402.
doi: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109915

17. Demakov A. V., Komnatnov M. E. TEM cell for Testing Low-profile Integrated Circuits for EMC // 21st Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Chelal, Russia, 29 June–03 July 2020. IEEE, 2020. P. 154–158.
doi: 10.1109/EDM49804.2020.9153508

Информация об авторах

Семенюк Валерий Александрович – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2022, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники), аспирант кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость; измерительные системы; помехоустойчивость микроконтроллеров.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: valerii.a.semeniuk@tusur.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5091-5028>

Комнатнов Максим Евгеньевич – кандидат технических наук (2016), доцент (2017) кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость; экранирование; измерительные системы; численные методы.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: maxmek@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6463-2889>

References

1. Klyuchnik A. V., Pirogov Yu. A., Solodov A. V. Methodological Aspects of Investigating the Resistance of Integrated Circuits to Electromagnetic Fields of Pulsed Radio Emission. J. of Radio Electronics. 2010, no. 8, pp. 1–27. Available at: <http://jre.cplire.ru/win/aug10/3/text.html> (accessed 23.05.2025) (In Russ.)

2. Pirogov Yu. A., Solodov A. V. Damage to Integrated Circuits in Radio Emission Fields. J. of Radio Electronics. 2013, no. 6, pp. 1–38. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.html> (accessed 23.05.2025) (In Russ.)

3. Akhramovich L. N., Gribsky M. P., Grigoryev E. V., Zuev S. A., Starostenko V. V., Churyumov G. I. Impact of Pulsed Electromagnetic Fields on Memory Integrated Circuits. Radioelectronics and Informatics. 2006, no. 4, pp. 15–17. (In Russ.)

4. Lin H.-N., Kuo C.-W., Chen C.-K., Chen J.-S. Analysis of EMI Effect on Flash Memory IC. Asia-Pacific Symp. on Electromagnetic Compatibility, Singapore, 21–24 May 2012. IEEE, 2012, pp. 757–760.
doi: 10.1109/APEMC.2012.6237824

5. Grigoryev E. V., Starostenko V. V., Taran E. P., Unzhakov D. A. Impact of Pulsed Electromagnetic Fields on ADC and DAC Microcircuits. Radioelectronics and Informatics. 2007, no. 4, pp. 22–24. (In Russ.)

6. Li C., Li J., Wu J., Xiao Y. Investigation on the Immunity of Microcontroller to Electrical Fast Transients. IEEE 11th Intern. Conf. ASIC (ASICON), Chengdu, China, 03–06 Nov. 2015. IEEE, 2015, pp. 1–4.
doi: 10.1109/ASICON.2015.7517086

7. Nicolae P.-M., Nicolae I.-D., Stănescu D.-G. Using GTEM Cells for Immunity Tests on Electronic Boards with Microcontroller. IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Pittsburgh, USA, 06–10 Aug. 2012. IEEE, 2012, pp. 44–49.
doi: 10.1109/ISEMC.2012.6351752

8. Industry Council on ESD Target Levels. White Paper 3: System Level ESD Part I: Common Misconceptions and Recommended Basic Approaches. Available at: <https://esdindustrycouncil.org/ic/en/documents/white-paper-3-system-level-esd-part-i-common-misconceptions> (accessed: 02.02.2025).

9. GOST R 51048 97. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya generatory elektromagnitnogo polya s TEM-kamerami. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Electromagnetic Field Generators with TEM Cells. Technical Requirements and Test Methods]. 12 p. Available at: <http://electro-control.ru/images/standarts/51048-97.pdf> (accessed: 02.02.2025).

10. Gao H., Cui L. Reliability Analysis for a Degradation System Subject to Dependent Soft and Hard Failure Processes. IEEE Intern. Conf. on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C). Prague, Czech Republic, 25–29 July 2017. IEEE, 2017, pp. 165–170.
doi: 10.1109/QRS-C.2017.33

11. Kim K. H., Koo J.-H., Kang B.-G., Kwon S., Kim Y., Jeong J. Systematic Design Technique for Im-

provements of Mobile Phone's Immunity to Electrostatic Discharge Soft Failures. IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Fort Lauderdale, USA, 25–30 July 2010. IEEE, 2010, pp. 348–353.
doi: 10.1109/ISEMC.2010.5711299

12. Izadi O. H., Pommerenke D., Shumiya H., Araki K. Investigation of Electrostatic Discharge-Induced Soft-Failure Using 3D Robotic Scanning. IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI), New Orleans, USA, 22–26 July 2019. IEEE, 2019, pp. 173–177.
doi: 10.1109/ISEMC.2019.8825248

13. Dienot J., Batista E., Ramos I. Thermal-Electromagnetic Susceptibility Behaviors of PWM Patterns Used in Control Electronic Circuit. 10th Intern. Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), Edinburgh, UK, 10–13 Nov. 2015. IEEE, 2015, pp. 190–195.
doi: 10.1109/EMCCompo.2015.7358355

14. Su T., Unger M., Steinecke T., Weigel R. New Test Method for the Pulse Immunity of Microcontrollers. IEEE

Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, USA, 09–13 July 2007. IEEE, 2007, pp. 1–6.
doi: 10.1109/ISEMC.2007.12

15. Su T., Unger M., Steinecke T., Weigel R. Using Error-Source Switching (ESS) Concept to Analyze the Conducted Radio Frequency Electromagnetic Immunity of Microcontrollers. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2012, vol. 54, no. 3, pp. 634–645.
doi: 10.1109/TEMC.2011.2165341

16. Demakov A. V., Komnatnov M. E. Improved TEM-cell for EMC Tests of Integrated Circuits. Intern. Multi-Conf. on Eng., Comp. and Inf. Sci. (SIBIRCON), Novosibirsk, Russia, 18–22 Sept. 2017. IEEE, 2017, pp. 399–402.
doi: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109915

17. Demakov A. V., Komnatnov M. E. TEM Cell for Testing Low-profile Integrated Circuits for EMC. 21st Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Chermal, Russia, 29 June–03 July 2020. IEEE, 2020, pp. 154–158.
doi: 10.1109/EDM49804.2020.9153508

Information about the authors

Valerii A. Semeniuk, Master's degree in "Infocommunication Technologies and Communication Systems" (2022, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics), Postgraduate student of the Department of Television and Control Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility; measurement systems; microcontroller noise immunity.

Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

E-mail: valerii.a.semeniuk@tusur.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5091-5028>

Maxim E. Komnatnov, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor (2017) of the Department of Television and Management of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility; shielding; measuring systems; numerical methods.

Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

E-mail: maxmek@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6463-2889>