

УДК 621.391.82: 621.3.049.77

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИОПОМЕХ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ТИТОВИЧ Н.А.

*Беларусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Исследовано влияния радиопомех на динамические параметры логических элементов. При проведении испытаний логические инверторы соединялись по схеме кольцевого генератора. Воздействия помехи проводились с использованием ТЕМ-камеры, а также по методу прямого введения мощности. Установлено, что быстродействующие микросхемы более восприимчивы к воздействию помех.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, интегральные микросхемы, радиопомеха, восприимчивость..

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF RADIO INTERFERENCE ON THE DYNAMIC PARAMETERS OF LOGIC ELEMENTS

N. A. TITOVICH

*Belarusian state university of informatics and radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The influence of radio interference on the dynamic parameters of logic elements is investigated. During the tests, the logic inverters were connected according to the circuit of the ring generator. Interference effects were carried out using a TEM-camera, as well as using the method of direct power injection. It was found that high-speed microchips are more susceptible to interference.

Keywords: electromagnetic compatibility, integrated circuits, radio interference, susceptibility.

Введение

В соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 32137-2013, устанавливающим требования к техническим средствам атомных станций по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС), включая требования устойчивости к электромагнитным помехам (ЭМП) и нормы помехоэмиссии, а также соответствующие методы испытаний, разработчик должен обеспечить устойчивую работу аппаратуры в условиях воздействия радиочастотного электромагнитного поля в полосе частот 0,15-2000 МГц и напряженностью от 1 до 30 В/м [1]. Источниками непреднамеренных кондуктивных помех, наведенных радиочастотными электромагнитными полями на входные и выходные порты, в том числе, электропитания переменного тока, электропитания постоянного тока, сигнальные порты, порты управления и ввода-вывода являются средства телекоммуникаций (прежде всего мобильные телефоны), различное промышленное оборудование. Наиболее восприимчивым рецептором к наведенным ЭМП являются полупроводниковые приборы (ПП) и интегральные микросхемы (ИМС). В некоторых случаях не исключено и воздействие преднамеренных помех. Иногда влияние мощных СВЧ помех приводит к выходу ПП из строя или деградиационному изменению их параметров. Однако наиболее вероятными и трудно диагностируемыми являются маломощные радиопомехи, вызывающие обратимые сбои в работе цифровых и аналоговых устройств. За счет эффекта детектирования ВЧ огибающей радиопомехи происходит изменение параметров ПП и ИМС, что в конечном итоге приводит к функциональному сбою в работе радиоэлектронного устройства (РЭУ). При уровнях поглощенной p - n -переходом мощности в десятки-сотни мВт происходит деформация его вольт-амперной характеристики (ВАХ), уменьшается коэффициент передачи биполярного и крутизна характеристики полевого транзистора, происходит изменение уровней логических нуля, единицы и времени задержки логических элементов (ЛЭ) [2].

Одним из наиболее эффективных путей обеспечения ЭМС РЭУ является учет при проектировании информации о восприимчивости к воздействию ЭМП их элементной базы, в особенности ПП и ИМС. Путем выбора менее восприимчивых элементов, рациональной защиты их наиболее уязвимых цепей можно значительно снизить затраты на обеспечение ЭМС, уменьшить габариты и вес аппаратуры. В связи с этим при проведении исследований необходимо

расширить номенклатуру исследуемых ПП, изучить динамику изменения наиболее критичных их параметров, опробовать различные методики оценки восприимчивости.

Экспериментальные исследования

При исследовании восприимчивости простых микросхем широко использовался метод сравнения выходных сигналов эталонной и исследуемой микросхем, позволяющий определять порог восприимчивости ИМС по критерию «достоверного сбоя». Более точным является критерий «вероятного сбоя», предполагающий одновременный контроль всех параметров выходного сигнала ИМС [2]. Однако точную оценку динамики изменения времени задержки ЛЭ и других ИМС обоими методами сделать трудно, так как необходимо учитывать влияние нагрузки, параметров сигнальных линий. При разработке быстродействующих цифровых систем точная оценка возможных отклонений временных параметров под действием ЭМП очень важна. В ряде случаев изменение времени задержки распространения на единицы и даже десятые доли наносекунды может привести к возникновению гонок сигналов и к сбою в работе оборудования, управляющего сложными технологическими процессами.

При исследовании изменения временных параметров ЛЭ хорошую точность позволяет получить метод «кольцевого генератора» [3]. Известно, что если нечетное число n логических инверторов (ЛИ) соединить последовательно в кольцевую схему, то за счет задержки распространения сигнала в элементах возникает положительная обратная связь и схема начинает работать, как автогенератор. По частоте генерации f_0 можно определить среднее время задержки распространения ЛЭ $t_{з\ p\ ср} = 1/2nf_0$. При воздействии ЭМП на все ЛЭ одновременно изменяется их время задержки распространения, а соответственно и частота генерации кольцевого генератора (КГ). По начальному f_0 и новому f_1 значению частоты можно определить среднее значение изменения времени задержки распространения

$$\Delta t_{з\ p\ ср} = (1/f_0 - 1/f_1) / 2n .$$

В этом случае для получения достоверных результатов важно обеспечить подачу одинакового уровня помеховых воздействий на одноименные выводы ЛЭ (вход, выход, вывод питания). Задача построения экспериментального макета на много упрощается, если радиопомеха воздействует на шину питания ИМС, содержащей несколько ЛЭ.

При построении экспериментальной установки для исследования восприимчивости ИМС в соответствии со стандартом IEC 62132 применяют два способа подачи ВЧ помехи: ТЕМ-камеры [4] и прямого введения мощности [5] (кондуктивный). Структурная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1.

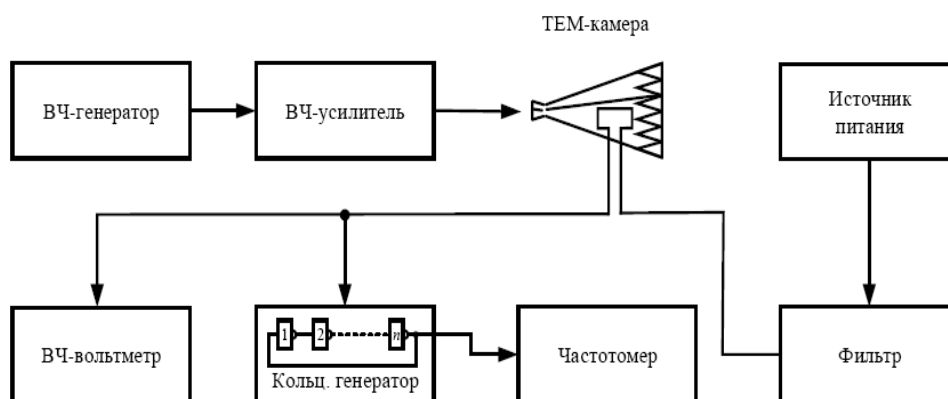


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

КГ из нечетного числа ЛИ помещен в экранированную измерительную камеру. На микросхему, на элементах которой собран КГ, через развязывающий фильтр подается питание. Контроль частоты генератора осуществляется с помощью частотомера или ВЧ осциллографа. При имитации ЭМП способом прямого введения мощности высокочастотная помеха подается от ВЧ-генератора (при необходимости усиливается) непосредственно в цепь питания ИМС. Уровень ВЧ помехи измеряется с помощью ВЧ вольтметра. При исследовании

восприимчивости к воздействию СВЧ помех схема предполагает измерение уровня поглощенной мощности и в соответствии со стандартом [5] после цепочки ВЧ-генератор – ВЧ-усилитель включается измеритель поглощенной мощности. Если применяется метод ТЕМ-камеры [4], то, как показано на рис.1, последовательно в цепь питания включается специальная рамка, расположенная непосредственно в камере, имеющую конструкцию рупорной антенны.

С использованием кондуктивного способа проведены исследования влияния радиопомех на работоспособность цифровых микросхем, производимых предприятиями Республики Беларусь и России. Результаты исследований показывают, что в большинстве случаев более критичными к воздействию радиопомех являются динамические параметры ЛЭ. У ЛЭ И-НЕ серий 531 и 555 недопустимые отклонения времени задержки распространения при включении и выключении наступают при уровнях ВЧ помех в несколько раз меньших тех, которые вызывают критические отклонения уровней логических нуля и единицы. Следует отметить, что ЛЭ с одинаковыми параметрами, но изготовленные по различным технологиям, по разному реагируют на помеховые воздействия. Для сравнения на рис. 2 приведены результаты исследований для ЛЭ 2И-НЕ серий 531 и 1533.

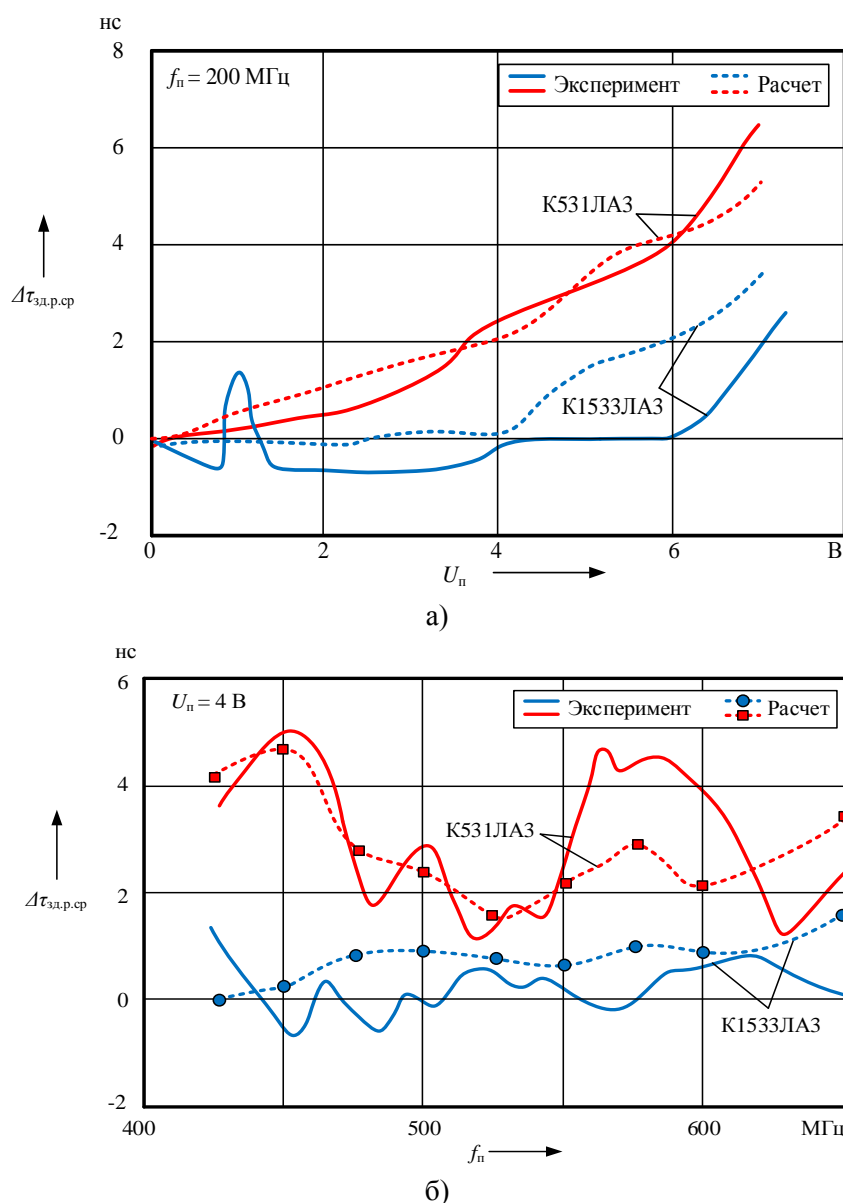


Рис.3. Результаты исследований методом прямого введения мощности.

Из приведенных зависимостей видно, что при разработке быстродействующих схем для уменьшения вероятности сбоев по причине гонок сигналов вместо микросхем серий 531

(аналогично 555 и 1554) следует использовать логические элементы серии 1533, среднее время задержки распространения которых значительно меньше изменяется по действием ЭМП. С целью оценки точности полученных результатов проведен расчет воздействия ЭМП на логические элементы И-НЕ серий 531 и 1533. Для анализа переходных процессов использовалась известная программа SPICE2. Модель базового ЛЭ микросхем представлялась эквивалентной электрической схемой самого элемента и элементами, моделирующими нагрузку, эквивалентную подключению к выходу исследуемого ЛЭ аналогичного элемента той же серии. Входной двухэмиттерный транзистор представлялся как одноэмиттерный, исходя из условий эксперимента, где входы соединялись между собой. Генератор помех моделировался источником ВЧ напряжения U_n , подключенным через разделительную емкость к цепи воздействия ЭМП, в нашем случае к шине питания ЛЭ. Параметры входного импульсного сигнала и напряжение питания моделировались введением в модель соответствующих источников и выбирались типовыми для элементов данных серий. Автор благодарен специалистам СКБ «Немига» Минского НПО «Интеграл» и Фрязинского филиала ЦНИИ «Циклон», предоставивших точные значения параметров моделируемых ЛЭ, что во многом отразилось на качестве результатов. Как видно из рис.2, данные расчетов и эксперимента достаточно хорошо совпадают.

При проведении эксперимента в качестве имитатора радиопомех использовались наиболее мощные отечественные ВЧ генераторы Г-143, Г-144. Их мощности достаточно для достижения значительного изменения параметров ЛИ при кондуктивном способе подачи ЭМП непосредственно в цепь питания через разделительный конденсатор. Для реализации же схемы с ТЕМ-камерой необходим ВЧ усилитель (рис.2).

Для проведения сравнительной оценки в лаборатории Дрезденского технического университета с помощью экспериментальной установки, изображенной на рис.2, содержащей ТЕМ-камеру, были испытаны шесть типов микросхем, выпускаемых западными фирмами: ТТЛ-схем - 7400 (4 двухвходовых элемента И-НЕ), 7402 (4 двухвходовых элемента ИЛИ-НЕ), 7404 (6 инверторов); КМОП-схем - 4011 (4 двухвходовых элемента И-НЕ), 4001 (4 двухвходовых элемента ИЛИ-НЕ), 4069 (6 инверторов). Этот способ подачи помехи более дорогой, т.к. требует больших аппаратных затрат (мощных имитаторов и усилителей ВЧ помех, ТЕМ-камеры). Однако он неизбежен при испытаниях готовых изделий и их блоков. В данном же случае одной из целей работы была сравнительная оценка результатов испытаний, полученных с помощью обоих методов подачи помех, для уточнения методики, использующей кондуктивный метод, и разработки в дальнейшем моделей для расчетной оценки восприимчивости цифровых устройств и их элементов к воздействию ЭМП. Благодаря применению новейшей аппаратуры удалось получить достаточные уровни электромагнитных полей и с высокой точностью измерить изменение среднего времени задержки распространения под действием помех.

Зависимость среднего времени задержки распространения ТТЛ и КМОП микросхем от уровня воздействующих на размещенную в ТЕМ-камере рамку электромагнитных полей представлены на рис. 4. Частота воздействующих радиопомех, как и в предыдущих экспериментах, выбрана равной 200 МГц. Испытания проводились не только для трех элементов в схеме кольцевого генератора, но и для $n=5$ и 7. Для КМОП микросхем исследования выполнены также и для различных напряжений их питания - 5, 10 и 15 В.

Анализ полученных результатов показывает, что при воздействии на перпендикулярно расположенную рамку площадью $0,002 \text{ м}^2$ электромагнитного поля с напряженностью 100 - 150 В/м (наводимое на шину питания ВЧ напряжение помехи соответственно 4 - 6 В) среднее время задержки распространения ТТЛ ИМС серии 74 возрастает на 2 - 4 нс, а КМОП схем на 4-6 нс. Аналогичная динамика $\Delta t_{з \text{ ср}}$ была получены ранее для микросхем серий 155 [3]. При увеличении напряженности поля до 200-250 В/м Δt ТТЛ ЛЭ возрастает на 6 и более наносекунд, а у КМОП схем оно уменьшается на 8-10 нс. Полученные зависимости имеют место как для случая включения трех элементов в схему КГ, так и для $n = 5$ и 7. Такой динамики не наблюдалось при исследованиях отечественных ЛИ. Но это можно объяснить скорее малой мощностью имитаторов, не позволивших создать достаточный уровень полей.

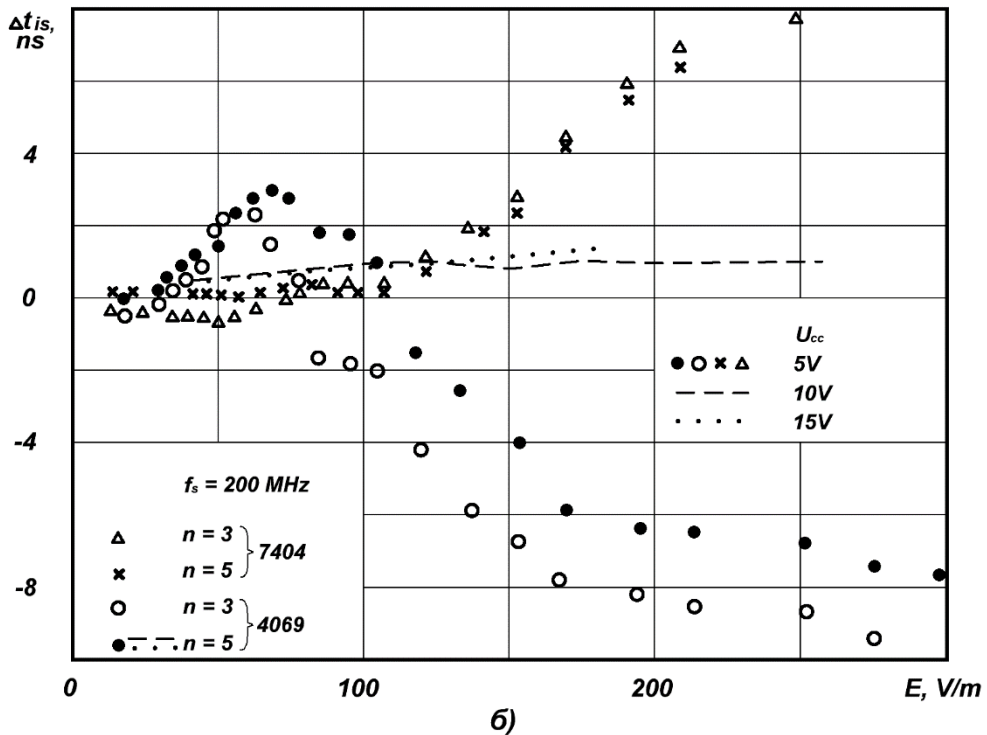
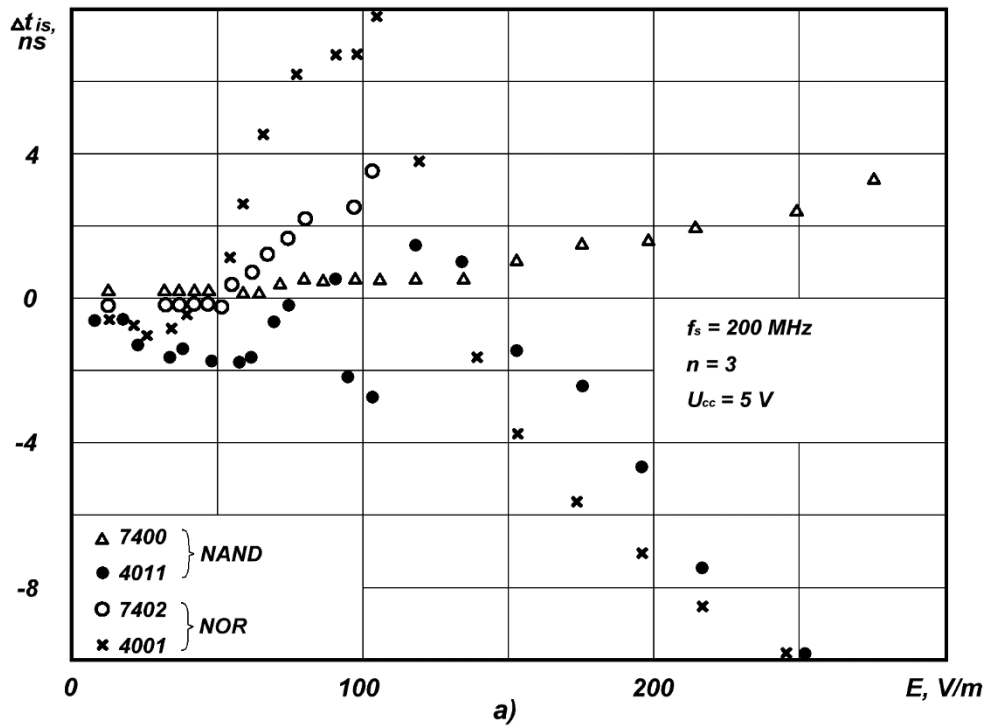


Рис.4. Результаты исследований при воздействии ЭМПс помощью ТЕМ-камеры.

Из приведенных результатов также видно, что в быстродействующих цифровых устройствах, когда к стабильности временных параметров предъявляются высокие требования, при питающих напряжениях 5 В лучше использовать ТТЛШ микросхемы. Для повышения помехоустойчивости КМОП схем необходимо увеличивать напряжение питания до 10 - 15 В. В

этом случае, как видно из рис. 4б, время задержки распространения изменяется незначительно (возрастает на 0,5 - 1 нс).

Заключение

Результаты эксперимента позволяют учесть все особенности влияния ЭМП на ПП и ИМС и разработать модели влияния радиопомех на простейшие элементы: диоды, транзисторы, ЛЭ. Хорошее совпадение результатов, полученных при расчете влияния радиопомех на базовые ЛЭ, с данными экспериментов дают основание использовать эти модели при оценке восприимчивости к воздействию ЭМП более сложных микросхем. Очевидно, что такой подход предполагает тесное сотрудничество радиоинженеров, работающих в этой области, с разработчиками микросхем. В этом случае важным является создание библиотеки точных простейших моделей, описывающих влияние помех на элементы схемы. Используя эту библиотеку для построения сложных схем можно расчетным путем оценить восприимчивость всего устройства, избежав тем самым сложного и дорогостоящего эксперимента. При проведении расчетов важно учитывать не только основные параметры элементов схемы и источника ЭМП, но и особенности конструкции микрочипа и корпуса. Исследования показывают, что неравномерности зависимости кривой восприимчивости ЛЭ от частоты, характерные для рис. 2б, объясняются чаще всего конструкцией корпуса, иногда конструкцией измерительной камеры. Анализ известных подходов к моделированию микросхем показывает, что при расчете удобнее разбивать модель на составные части: ядро, корпус, цепи питания и входные/выходные цепи [6].

При оценке же восприимчивости блоков и устройств целесообразно проводить испытания с использованием ТЕМ-камеры. Перед экспериментом проводится предварительное расчетное моделирование влияния ЭМП на элементы и устройства. Это позволяет значительно сократить затраты времени и средств. Используя для построения расчетов библиотеку простых моделей, можно прибегать к проведению эксперимента только на стадии испытаний законченного блока или устройства.

Список литературы

1. ГОСТ 32137-2013 Межгосударственный стандарт «Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных станций. Требования и методы испытаний».
2. Титович Н.А., Ползунов В.В. Исследование восприимчивости полупроводниковых приборов к воздействию электромагнитных помех // Журнал «Доклады БГУИР», 2015, №1, с.114-118.
3. Титович Н.А. Оценка влияния электромагнитных помех на динамические параметры цифровых схем// Радиотехника и электроника. - Мн., Выш. шк. 1991, вып. 20. с.84-87.
4. Стандарт IEC62132-2(2010). Интегральные схемы. Измерение стойкости к электромагнитным помехам, от 150 kHz до 1 GHz. Часть 2. Измерение стойкости к излученным помехам. Ячейка ТЕМ и метод с использованием широкополосной ТЕМ.
5. Стандарт IEC62132-4(2006). Интегральные схемы. Измерение стойкости к электромагнитным помехам, от 150 kHz до 1 GHz. Метод прямой радиочастотной подпитки.
6. Титович, Н. А. Моделирование воздействия радиопомех на полупроводниковые приборы и микросхемы / Титович Н. А., Теслюк В. Н., Тарасенко В. А. // 8-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, 16–17 мая 2019 г., Минск: сборник научных статей. В 5 ч. Ч. 4. / Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь. – Минск: Лаборатория интеллекта, 2019. – С. 67-69.