

УДК 621.372

Гибридный способ защиты от сверхкоротких импульсов на основе меандровой линии и газоразрядного устройства

Ким Г. Ю., Малыгин К. П., Жечев Е. С., Конев В. Ю., Носов А. В.

Постановка задачи: с развитием радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) повышается ее быстродействие, уменьшаются рабочие напряжения и увеличивается плотность трассировки печатных плат, что увеличивает восприимчивость РЭА к различным электромагнитным воздействиям (ЭМВ). Известно, что ЭМВ могут представлять угрозу для современной РЭА. Так, генераторы мощных ЭМВ могут быть использованы злоумышленниками для дестабилизации или полного выведения из строя критической инфраструктуры. Серьезную угрозу для РЭА представляет сверхкороткий импульс (СКИ). Известны традиционные устройства защиты от СКИ, но они имеют недостатки: низкая мощность и быстродействие, ограниченный ресурс срабатываний, а также, низкая радиационная стойкость из-за полупроводниковых компонентов в их составе. Это неприемлемо, например, для космической отрасли, из-за необходимости повышения срока активного существования космических аппаратов до 15 лет. В этой связи, необходим поиск новых подходов к защите РЭА, лишенных таких недостатков. Один из перспективных подходов к защите – разложение СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды в меандровой линии (МЛ). Примечательно использование МЛ совместно с газоразрядными устройствами защиты с недостаточным быстродействием, обусловленным тем, что на возникновение электрического разряда требуется значительное время. По этой причине защищаемые цепи в РЭА должны выдерживать воздействие помехи до тех пор, пока устройство не сработает. В этой связи, воздействие мощного СКИ может быть губительным, поскольку газоразрядное устройство не успеет сработать из-за быстрого нарастания СКИ. Однако при совместном использовании МЛ с газоразрядным устройством можно попытаться исключить этот недостаток. Так, сначала СКИ будет разложен на последовательность импульсов меньшей амплитуды в МЛ (до 3 и даже 4 импульсов в одном витке МЛ и более в многокаскадных и многопроводных структурах), первый из которых, пройдя через газоразрядное устройство, может «подготовить» его к срабатыванию, а остальные уже будут ограничены газоразрядным устройством. При этом, чтобы защищаемые цепи выдержали воздействие СКИ до тех пор, пока не сработает газоразрядное устройство, СКИ в МЛ может быть разложен на последовательность импульсов с возрастающей амплитудой каждого импульса. Такое гибридное устройство позволит значительно улучшить эффективность защиты РЭА от СКИ меньшей длительности. **Цель работы:** продемонстрировать возможность ослабления СКИ в гибридном устройстве защиты на основе МЛ и газоразрядного устройства защиты. **Используемые методы:** анализ, а также вычислительный (на основе разных численных методов) и натурный эксперименты. **Новизна:** предложено гибридное устройство защиты от СКИ на основе МЛ и газоразрядного устройства, отличающееся совместным использованием их свойств. Кроме того, впервые сформулированы условия разложения СКИ в таких гибридных устройствах защиты. **Результат:** Выполнен детальный анализ влияния длительности воздействия на защитные характеристики газоразрядного устройства посредством моделирования с использованием SPICE-модели и натурных испытаний. По результатам анализа оптимизирована SPICE-модель для более наглядных результатов, а также сформулированы условия для своевременного срабатывания газоразрядного устройства. В результате, на выходе МЛ с газоразрядным устройством увеличено ослабление СКИ, в сравнении с только МЛ. Рассмотрены два различных воздействия и две структуры на основе МЛ. Продемонстрировано, как первый импульс с вы-

Библиографическая ссылка на статью:

Ким Г. Ю., Малыгин К. П., Жечев Е.С., Конев В.Ю., Носов А. В. Гибридный способ защиты от сверхкоротких импульсов на основе меандровой линии и газоразрядного устройства // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 2. С. 149-172. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-149-172

Reference for citation:

Kim G. Y., Malygin K. P., Zhechev E. S., Konev V. Y., Nosov A. V. Hybrid method of protection against ultrashort pulses based on a meander line and a gas-discharge device. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 2, pp. 149-172 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-149-172

хода линий подготавливает газоразрядное устройство к срабатыванию и остальные импульсы подаются уже им. Несмотря на то, что в этом случае первый импульс (который подготавливает газоразрядное устройство к срабатыванию) проходит дальше и не ослабляется, его амплитуда все же меньше, чем у исходного импульса. Это важно для уменьшения нагрева чувствительных элементов РЭА. В этом случае максимальное ослабление СКИ в структурах 1 и 2 составило 25 и 44 раза соответственно. Дополнительно рассмотрен случай, когда газоразрядное устройство включено на входе в линию. В этом случае получен примечательный результат: выявлено, что такое включение предпочтительнее для максимального подавления СКИ. В этом случае максимальное ослабление СКИ в структурах 1 и 2 составило 102 и 143 раза. **Практическая значимость:** решение может использоваться в критичной РЭА для защиты от СКИ, например, в цепях питания.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, меандровая линия, четная мода, нечетная мода, электромагнитная совместимость, газоразрядное устройство, помехозащита.

Введение

С развитием РЭА уменьшаются рабочие напряжения и увеличивается плотность трассировки печатных плат, что увеличивает восприимчивость РЭА к различным ЭМВ. Известно, что ЭМВ могут представлять угрозу для современной РЭА [1, 2]. Так, генераторы мощных ЭМВ могут быть использованы злоумышленниками для дестабилизации или полного выведения из строя критичной инфраструктуры [3–7]. Серьезную угрозу для РЭА представляет СКИ [8]. Известны традиционные устройства защиты от СКИ, но они имеют недостатки: низкие мощность и быстродействие, а также ограниченный ресурс [9]. Поэтому актуален поиск новых подходов и устройств защиты, у которых отсутствуют указанные недостатки. Известны устройства на основе печатных структур для защиты от ЭМВ и фильтрации сигнала в полосе частот [10–12]. Один из перспективных подходов к защите РЭА основан на ослаблении СКИ в МЛ за счет модального разложения [13]. Он перспективен, поскольку может не требовать устройства защиты как такового, а использовать уже имеющиеся на печатной плате МЛ. Подход заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов (перекрестной наводки, нечетной и четной мод) меньшей амплитуды в меандровой МПЛ с выравниванием их амплитуд. Это дает ослабление амплитуды СКИ в 2,4 раза в самом простом случае [13].

Актуальным и примечательным видится использование МЛ совместно с газоразрядными устройствами защиты. Для такого устройства характерно недостаточное быстродействие [14], обусловленное тем, что на возникновение электрического разряда в нем требуется значительное время. По этой причине защищаемые цепи в РЭА должны выдерживать воздействие помехи до тех пор, пока устройство не сработает. В этой связи, воздействие мощного СКИ может быть губительным, поскольку газоразрядное устройство не успеет сработать из-за быстрого нарастания СКИ. Однако при совместном использовании МЛ с газоразрядным устройством можно попытаться исключить этот недостаток. Так, сначала СКИ будет разложен на последовательность импульсов меньшей амплитуды в МЛ (до 3 и 4 импульсов в одном витке МЛ и более в многокаскадных и многопроводных структурах), первый из которых, пройдя через газоразрядное устройство, может «подготовить» его к срабатыванию, а остальные уже будут отсечены газоразрядным устройством. При этом, чтобы защищаемые це-

пи выдержали воздействие СКИ до тех пор, пока не сработает газоразрядное устройство, СКИ в МЛ может быть разложен на последовательность импульсов с возрастающей амплитудой по мере прихода каждого импульса. Такое гибридное устройство позволит значительно улучшить защиту РЭА от СКИ меньшей длительности.

Таким образом, цель данной работы – продемонстрировать возможность ослабления СКИ в гибридном устройстве защиты на основе МЛ и газоразрядного устройства защиты.

Исходные данные и анализ полученных ранее результатов

Для исследования выбраны две структуры МЛ: свернутая меандровая МПЛ (структура 1) [15] и меандровая МПЛ с двумя пассивными проводниками (структура 2) [16]. Выбор обусловлен их измеренными S -параметрами, которые далее будут использованы при исследовании совместно с газоразрядным устройством. Это позволит получить более достоверные результаты. Кроме того, эти структуры позволяют разложение СКИ на множество импульсов с существенным ослаблением, что при совместном использовании с газоразрядным устройством позволит более эффективную защиту. Схемы соединений структур 1 и 2 представлены на рис. 1. Все резисторы на рис. 1 приняты равными по 50 Ом. Поперечные сечения структур 1 и 2 в развернутом виде представлены на рис. 2.

Известно, что в структуре 1 из рис. 2а СКИ раскладывается на 3 импульса [15] при обеспечении следующих условий:

$$2l\tau_1 \geq t_{\Sigma}, \quad (1)$$

$$2l(\tau_e - \tau_o) \geq t_{\Sigma}, \quad (2)$$

где l – длина витка (отрезка), τ_e и τ_o – погонные задержки четной и нечетной мод витка соответственно, а t_{Σ} – общая длительность воздействия.

В структуре из рис. 2б СКИ раскладывается на 11 импульсов [16] при обеспечении следующих условий:

$$2l\tau_1 \geq t_{\Sigma}, \quad (3)$$

$$l\tau_2 - l\tau_1 \geq 2t_{\Sigma}, \quad (4)$$

$$2l\tau_2 \geq l\tau_1 + l\tau_3 + t_{\Sigma}, \quad (5)$$

$$l\tau_3 \geq l\tau_2 + t_{\Sigma}, \quad (6)$$

$$l\tau_1 + l\tau_4 \geq 2l\tau_3 + t_{\Sigma}, \quad (7)$$

$$l\tau_4 - l\tau_3 \geq 4t_{\Sigma}, \quad (8)$$

где $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ – погонные задержки 1–4 мод соответственно.

Параметры поперечного сечения и длина структуры 1, обеспечивающие выполнение (1)–(2) при $t_{\Sigma}=0,2$ нс: $w=300$ мкм, $s=125$ мкм, $t=18$ мкм, $h=508$ мкм, $\epsilon_r=10,2$, $l=1$ м. Параметры поперечного сечения структуры 2 и длина, обеспечивающие выполнение (3)–(8) при $t_{\Sigma}=0,2$ нс: $w_1=200$ мкм, $w_2=300$ мкм, $w_3=1900$ мкм, $w_4=600$ мкм, $s=400$ мкм, $t=18$ мкм, $h=508$ мкм, $\epsilon_r=10,2$, $l=2,1$ м.

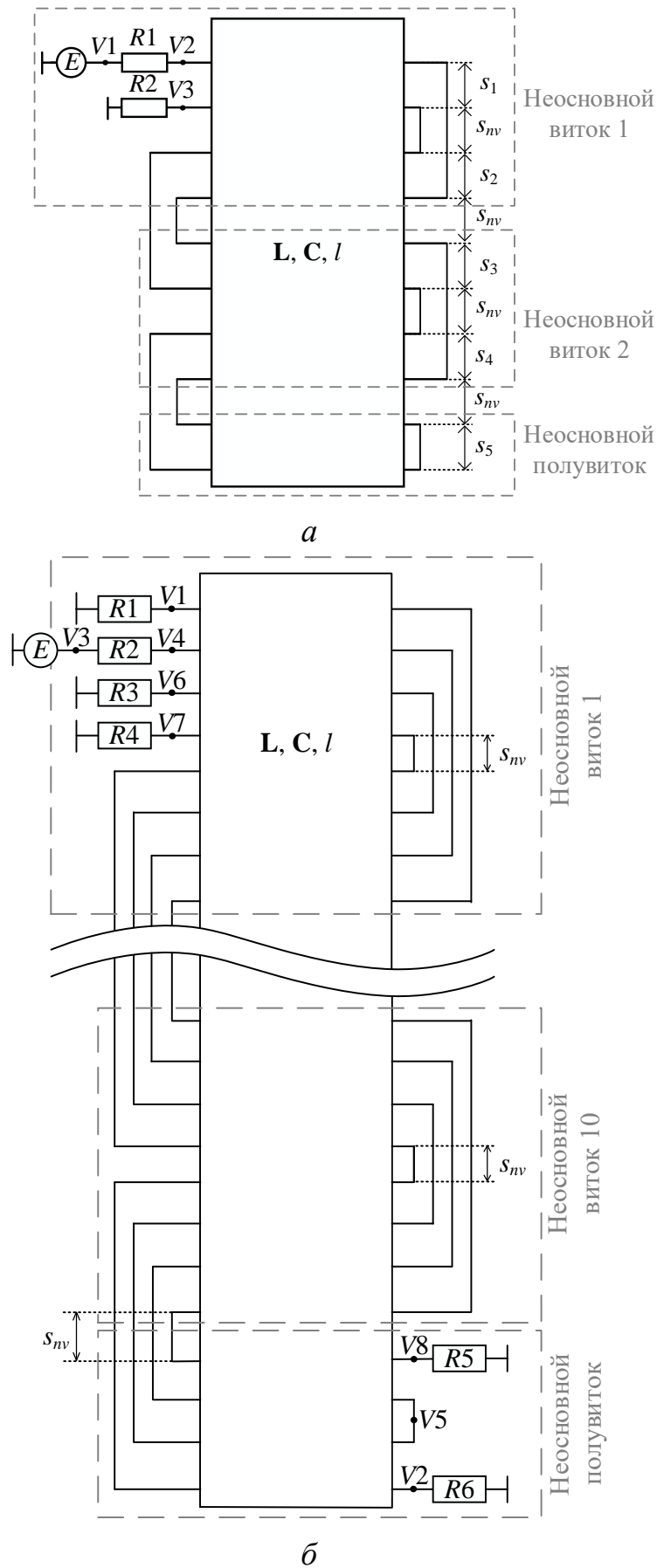


Рис. 1. Схемы соединений структур 1 (а) и 2 (б)

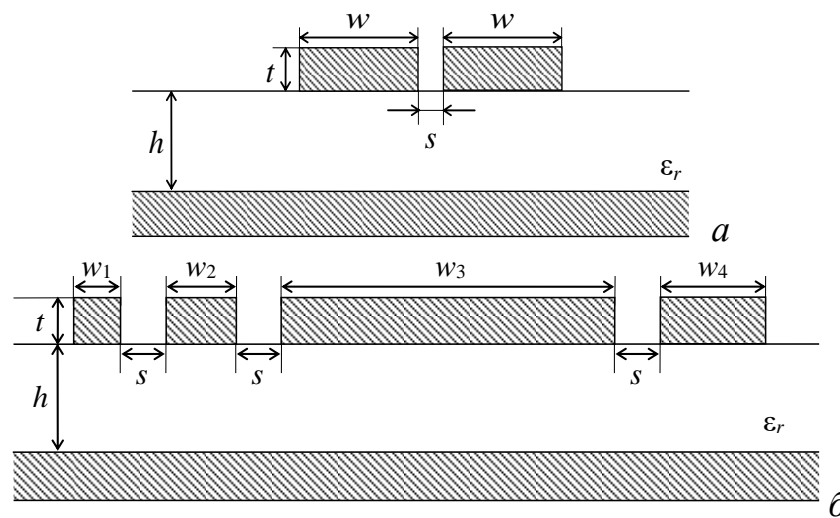
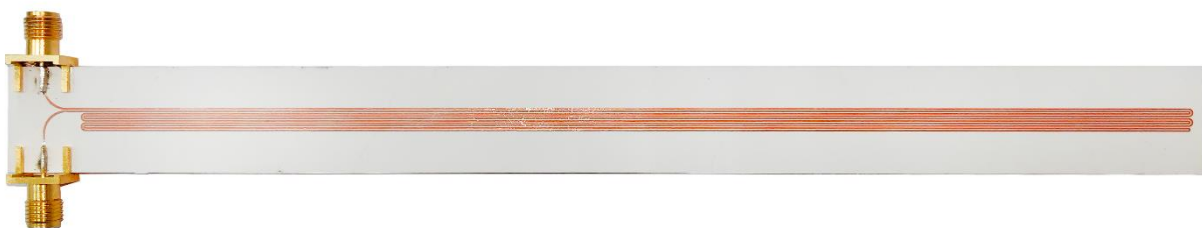


Рис. 2. Поперечные сечения структур 1 (а) и 2 (б) в развернутом виде

Вычислены погонные задержки четной и нечетной мод структуры 1 в системе TALGAT [17], в которой реализован расчет матриц погонных параметров линий передачи методом моментов, а также временного отклика методом узловых потенциалов [18]: $\tau_o=7,59$ нс/м, $\tau_e=8,69$ нс/м. При подстановке известных переменных в условия (1) и (2) они выполняются с запасом. Погонные задержки мод структуры 2: $\tau_1=7,76$ нс/м, $\tau_2=8,24$ нс/м, $\tau_3=8,48$ нс/м, $\tau_4=9,8$ нс/м. При подстановке известных переменных в условия (3)–(8) они выполняются с запасом. Далее эти структуры были свернуты, как показано на рис. 1, для увеличенного ослабления СКИ [15, 16]. Расстояния между неосновными полувитками s_{mv} структуры 1 приняты равными 200 мкм, а структуры 2 – 400 мкм. Изготовлены макеты структур 1 и 2 для натуральных испытаний во временной и частотной областях (рис. 3). Воздействовали импульсом с генератора С9-11 (рис. 4).

На рис. 5 представлены формы напряжения на выходе структур 1 и 2, полученные ходе эксперимента, а также квазистатического и электродинамического моделирования.

Из рис. 5 видно, что СКИ на выходе структур 1 и 2 раскладывается на множество импульсов. Ослабление СКИ в структуре 1 составило 5,8, 5,6 и 3,9 раза в ходе эксперимента, при электродинамическом и квазистатическом анализе соответственно, а в структуре 2 – 17,3, 17,1 и 12,6 раза соответственно. Получено хорошее согласование. Различие ослабления, полученного при квазистатическом подходе, обусловлено нечетом потерь.



а



б

Рис. 3. Изготовленные макеты структур 1 (а) и 2 (б)

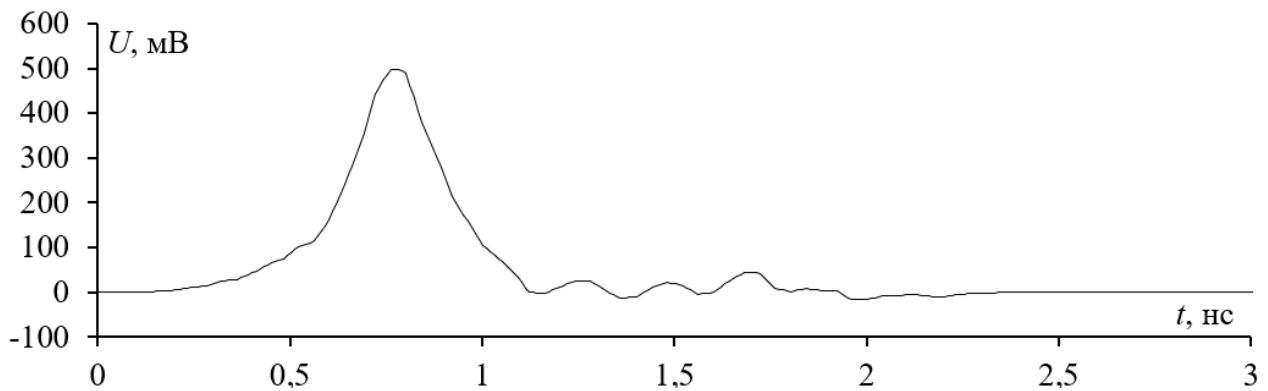
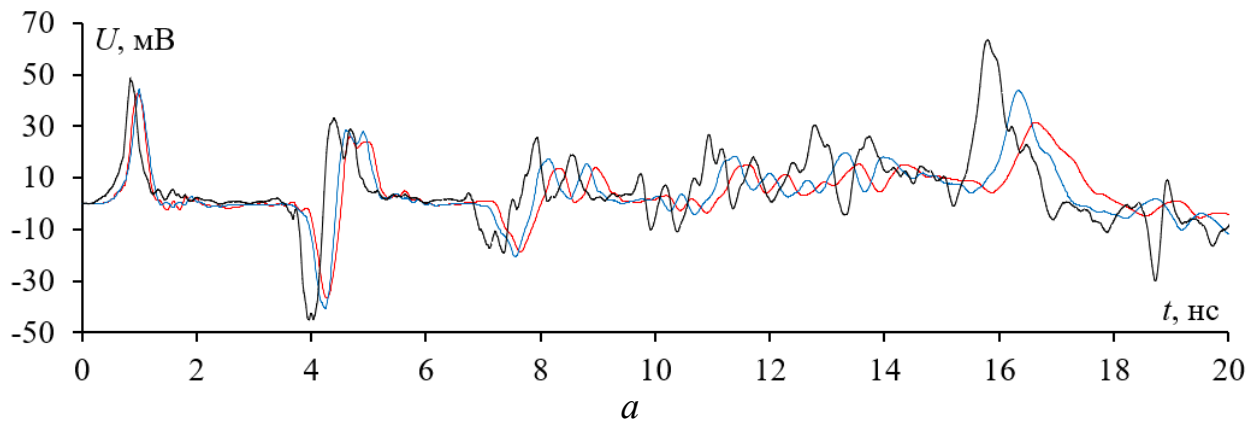


Рис. 4. Оцифрованный импульс с выхода генератора С9-11



а

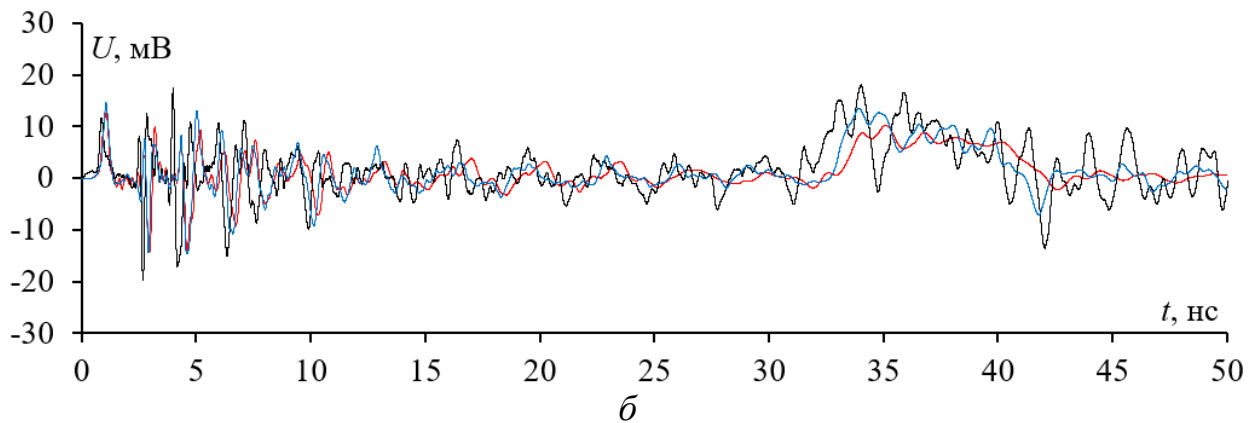


Рис. 5. Формы напряжения на выходе структур 1 (а) и 2 (б), полученные в ходе эксперимента (---), квазистатического (—) и электродинамического (—) моделирования

Анализ влияния длительности воздействия на характеристики газоразрядного устройства

Для анализа влияния длительности воздействия на защитные характеристики газоразрядного устройства выполнено моделирование в САПР Advanced Design System (ADS) с использованием SPICE модели из [18] на рис. 6.

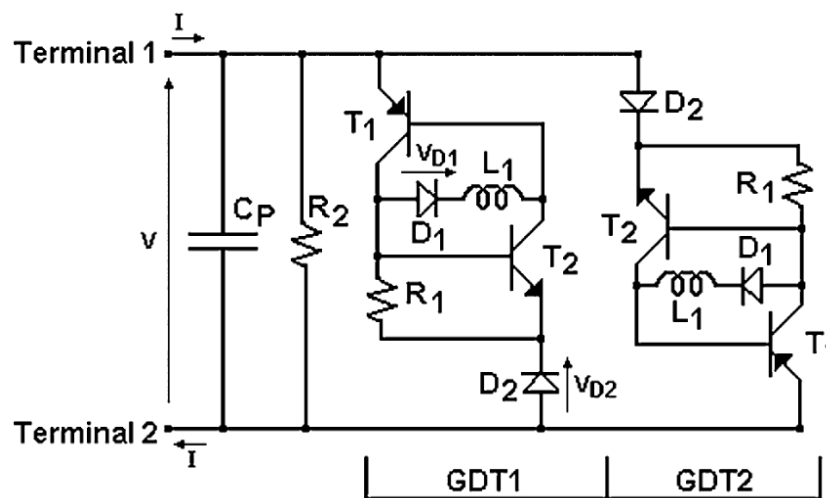


Рис. 6 Используемая SPICE-модель газоразрядного устройства [18]

Для исследования выбрано газоразрядное устройство EC75X. Его схема включения, используемая при моделировании, представлена на рис. 7, где $R1=R2=50$ Ом. Исходные параметры SPICE модели EC75X: амплитуда срабатывания (V_b) – 75 В, время срабатывания транзисторов ($t_{ст}$) – 0,15 нс, напряжение удержания (V_h) – 55 В, $R1=1$ Ом, $R2=10$ ГОм, $C_p=1,5$ пФ, $L=0,68$ мкГн.

Сначала выполнен анализ влияния общей длительности импульсного воздействия на защитные характеристики газоразрядного устройства за счет увеличения его плоской вершины ($t_{пв}$). На рис. 8 представлены отклики газоразрядного устройства на воздействие трапециевидным импульсом с э.д.с. 10 кВ и $t_{пв}=1, 2, 5, 12, 15$ нс при длительностях фронта (t_f) и спада (t_c) по 1 нс.

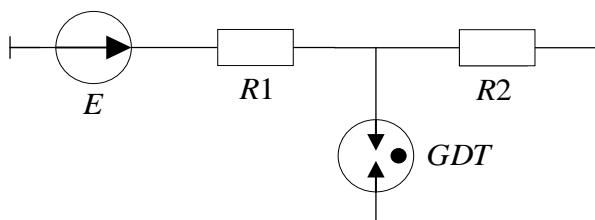


Рис. 7. Схема включения газоразрядного устройства

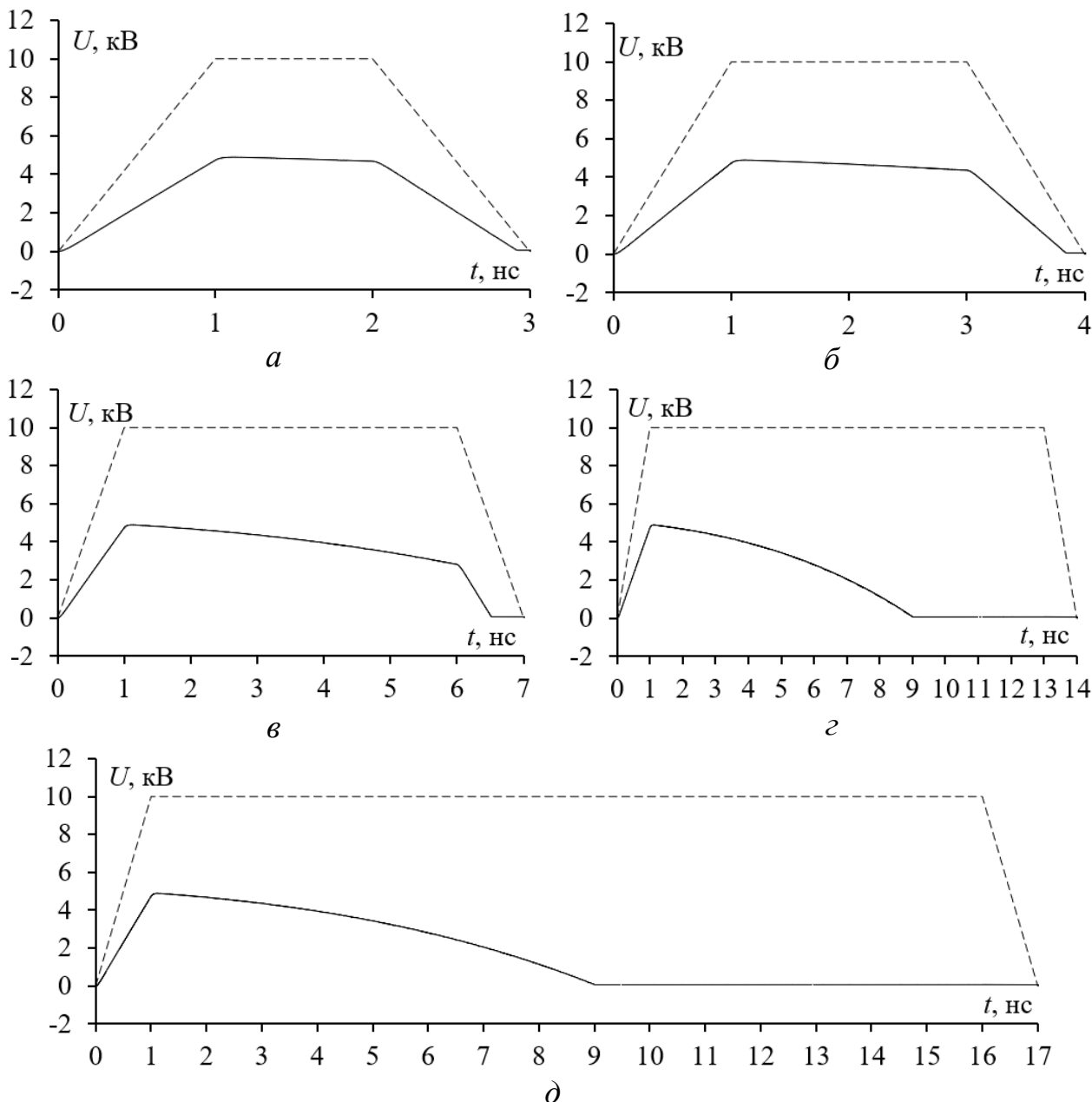


Рис. 8. Формы э.д.с. (---) и отклика газоразрядного устройства (—) при $t_{пв}=1$ (а), 2 (б), 5 (в), 12 (г), 15 (д) нс

Из рис. 8 видно, что максимальная амплитуда воздействия (U_{max}) после его прохождения по газоразрядному устройству не изменяется при увеличении $t_{пв}$ и равна $U_{max}=4885$ В. Однако при этом площадь под кривой уменьшается. Также видно, что газоразрядное устройство полностью переходит в рабочий

режим (напряжение горения электрической дуги) через $t_{cr}=9$ нс при $t_{пв}=12, 15$ нс, а при $t_{пв}=1, 2, 5$ нс находится в режиме тления. Однако режим работы газоразрядного устройства даже при $t_{пв}=1, 2, 5$ нс может использоваться при совместном использовании с МЛ, поскольку в МЛ после первого импульса (перекрестной наводки) будут присутствовать основные импульсы разложения и импульсы, возникающие в результате отражений. В этом случае при определенных условиях последующий импульс, после первого, может уже полностью включить газоразрядное устройство в последний рабочий режим (горение электрической дуги). Более детально это рассмотрено на примере воздействия периодического импульсного сигнала с параметрами: $t_{\phi}=t_c=t_{пв}=1$ нс, амплитуда э.д.с. 1 кВ, период 3, 6 и 9 нс (рис. 9).

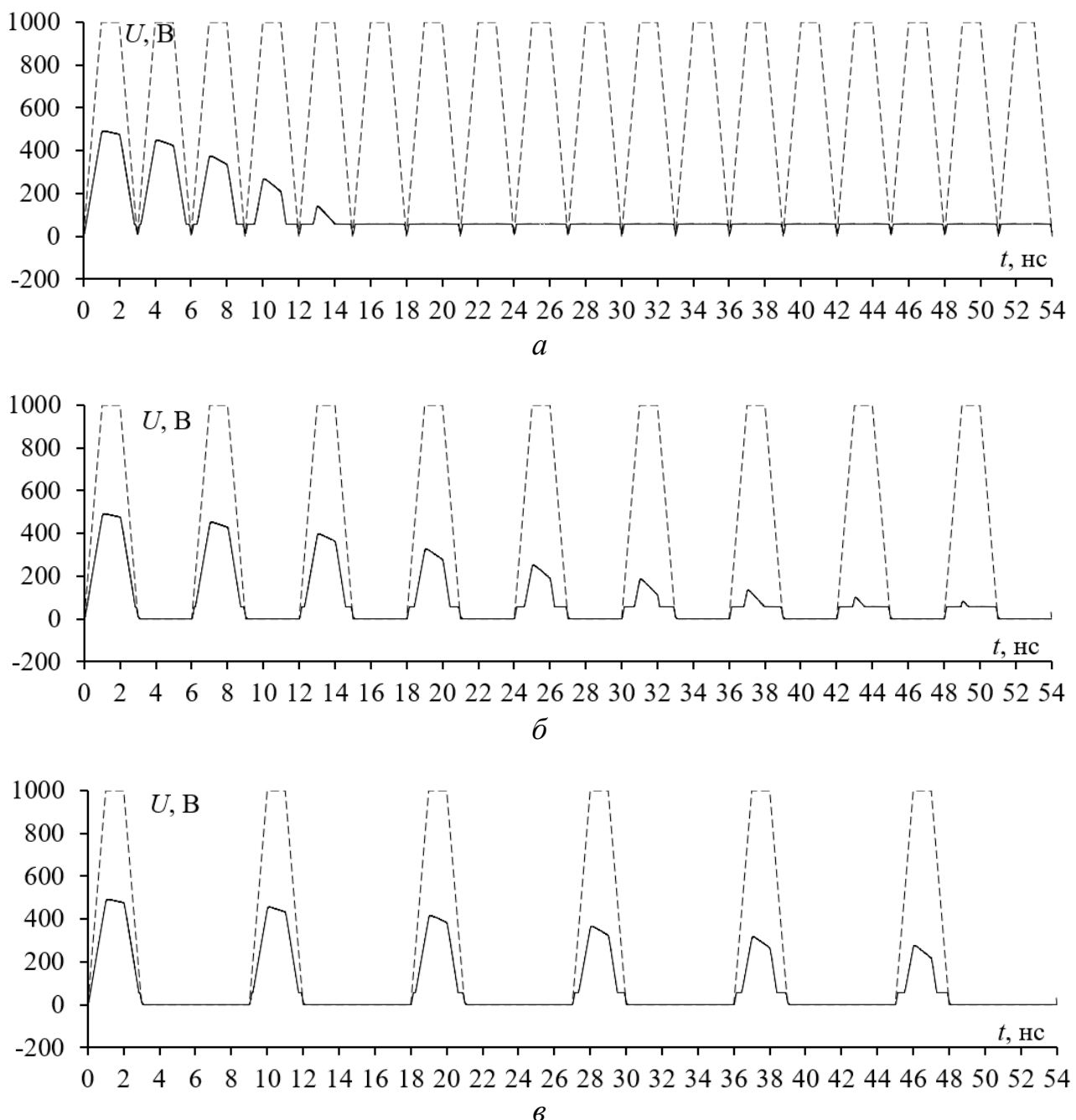


Рис. 9. Отклик газоразрядного устройства ЕС75Х на воздействие импульсного сигнала с периодом 3 (а), 6 (б) и 9 (в) нс

Из рис. 9 видно, что газоразрядное устройство при воздействии с периодом 3 нс переходит в последний рабочий режим (горение дуги) на пятом импульсе воздействия (14 нс), с периодом 6 нс – на девятом (49,5 нс), а при 9 нс – этого не происходит. Таким образом, чем позже приходит последующий импульс после окончания первого, тем больше времени требуется газоразрядному устройству для перехода в последний рабочий режим (горение дуги). Однако, даже когда газоразрядное устройство находится в режиме тления возможна более эффективная защита от последующих импульсов, чем в ситуации, когда через газоразрядное устройство проходит один импульс малой длительности.

Анализировалось влияние одновременного изменения t_{ϕ} и t_c импульсного воздействия на защитные характеристики газоразрядного устройства модели ЕС75Х без изменения его общей длительности. На рис. 10 представлен отклик газоразрядного устройства на воздействие трапециевидным импульсом с э.д.с. 10 кВ и общей длительностью 30 нс при $t_{\phi}=t_c=1, 2, 5, 12, 15$ нс.

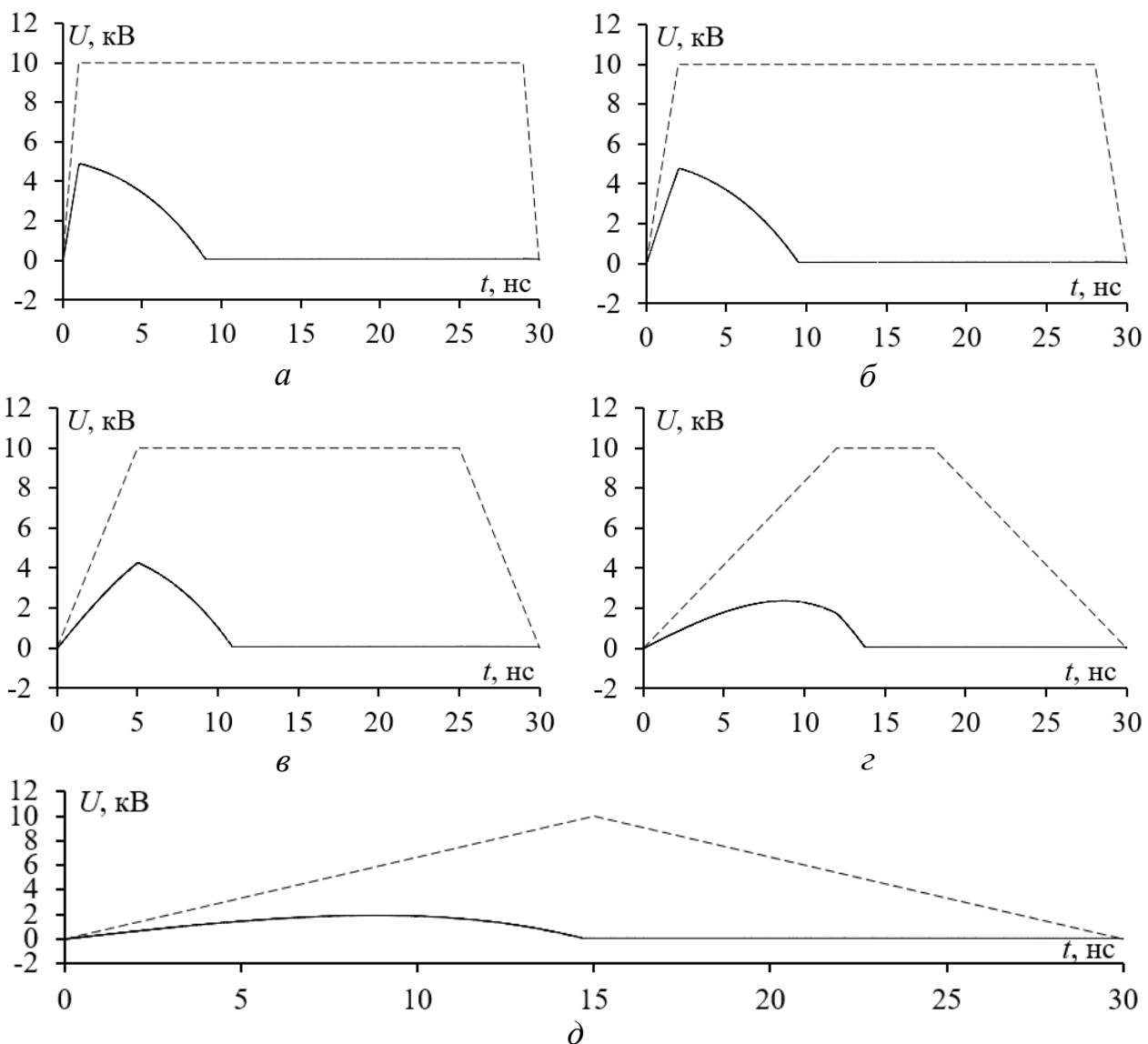


Рис. 10. Отклик газоразрядного устройства ЕС75Х (—) при $t_{\phi}=t_c=1$ (а), 2 (б), 5 (в), 12 (г), 15 (д) нс и форма э.д.с. (---)

Из рис. 10 видно, что U_{\max} уменьшается при увеличении t_{ϕ} и t_c , а t_{cr} – увеличивается. Так, $U_{\max}=4,89, 4,77, 4,26, 2,37, 1,92$ кВ, а $t_{cr}=9, 9,5, 11, 14, 15$ нс при $t_{\phi}=t_c=1, 2, 5, 12, 15$ нс соответственно.

Проанализированы результаты воздействия мощных импульсов на устройство ЕС75Х, полученные при проведении натурального эксперимента. В результате этого найдены оптимальные параметры SPICE модели газоразрядного устройства, наиболее близко повторяющие реальный отклик ЕС75Х: $t_{cr}=50$ пс и напряжение срабатывания диодов SPICE модели 950 В. SPICE модель с этими параметрами далее будет определяться, как SPICE модель 1. В качестве генератора использовался генератор, разработанный в ИСЭ СО РАН, позволяющий генерацию импульса до 4 кВ с общей длительностью около 80 нс, а его фронт по уровню 0,1-0,9 составил приблизительно 25 нс. В качестве осциллографа использовался Agilent DSO9254A с аттенюатором 75 дБ для его защиты. Фото экспериментальной установки представлено на рис. 11

На рис. 12 представлены формы напряжения с выхода генератора при 3 воздействиях с длительностью 40 нс по уровню 0,5 и амплитудами 1, 2 и 4 кВ.

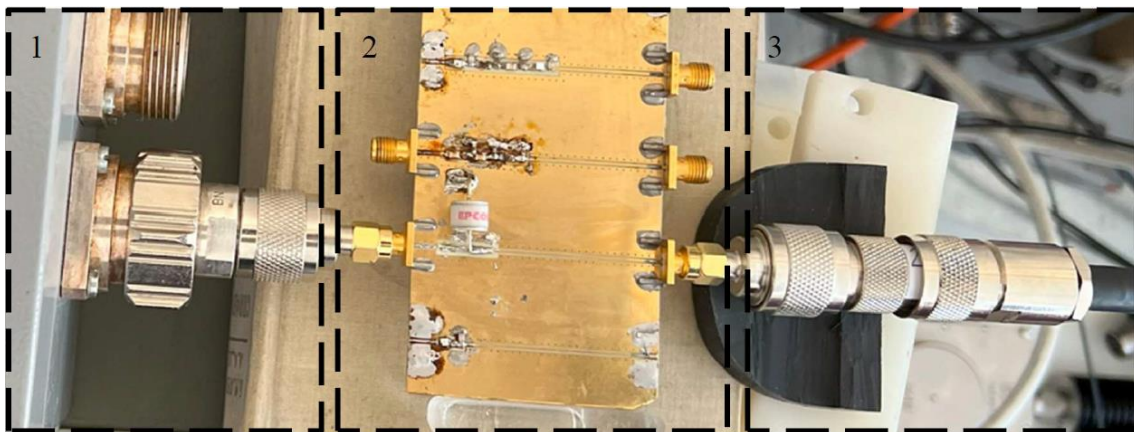


Рис. 11. Экспериментальная установка, где 1 – генератор, 2 – линия передачи с газоразрядным устройством, 3 – выход на аттенюатор и осциллограф Agilent DSO9254A

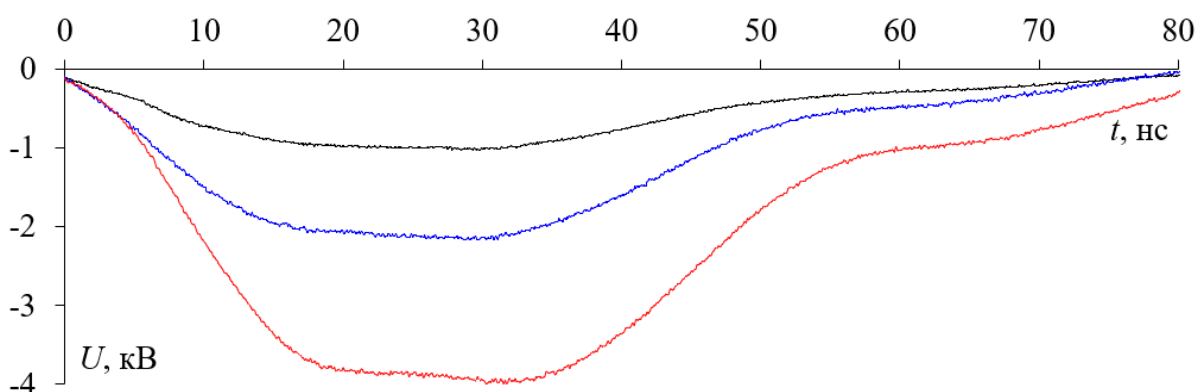


Рис. 12. Формы напряжения с выхода генератора амплитудой 1 (—), 2 (—) и 4 (—) кВ

На рис. 13 представлены отклики газоразрядного устройства на воздействия, полученные экспериментально и при моделировании с исходной и оптимизированной ($V_b=950$ В, а $t_{ct}=50$ пс) SPICE моделями.

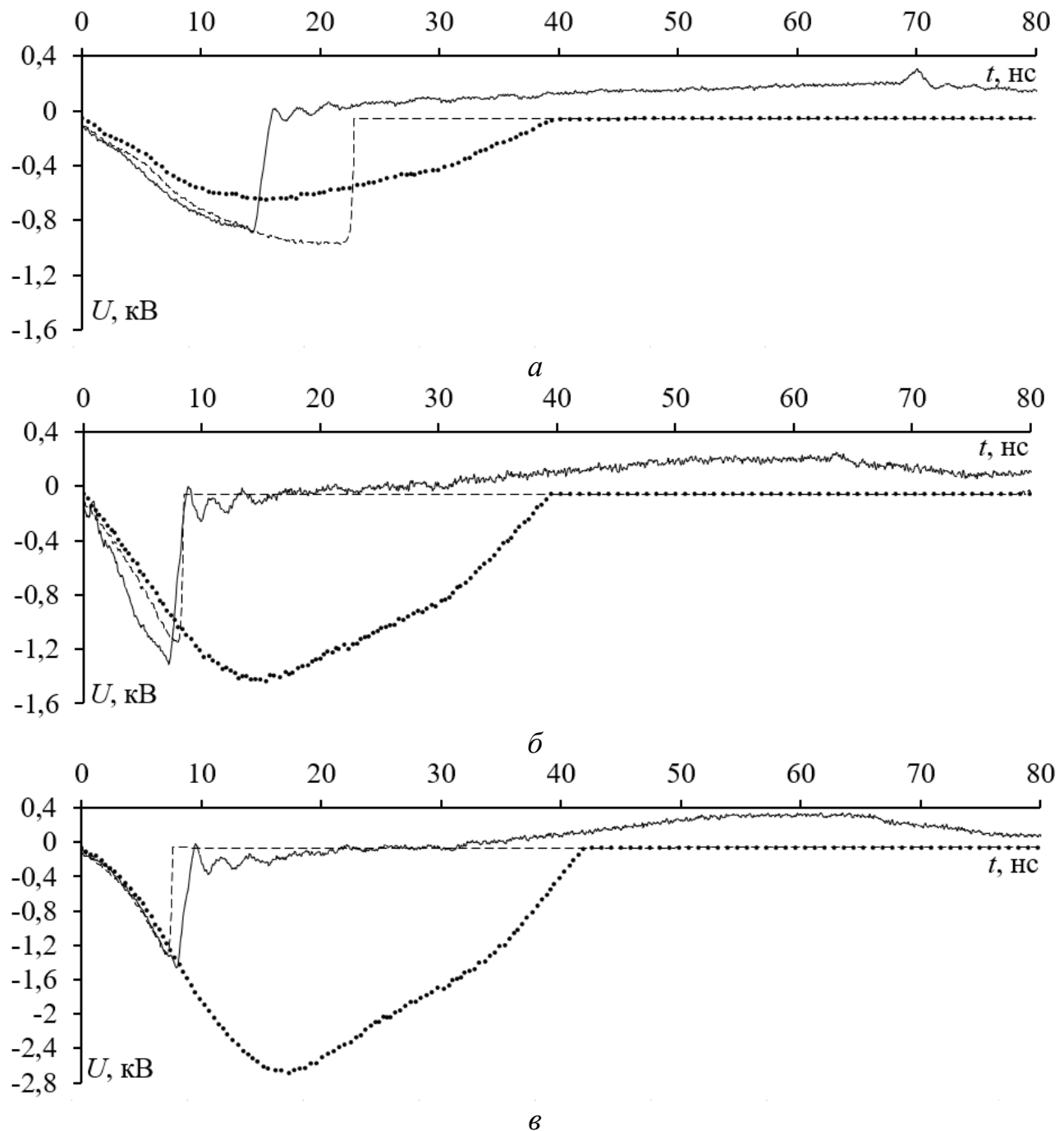


Рис. 13. Отклик газоразрядного устройства EC75X, полученный экспериментально (—), на основе исходной ($\cdot \cdot$) и новой SPICE модели (— —) на воздействия с амплитудами напряжения 1 (а), 2 (б) и 4 (в) кВ

Из рис. 13 видно, что отклик, полученный посредством оптимизированной SPICE модели, хорошо согласуется с экспериментальным, при этом разница U_{max} между экспериментальной и исходной SPICE моделями не превышает 13%, а t_{ct} — 7 нс. Стоит отметить, что дополнительная оптимизация SPICE мо-

дели с учетом амплитуды входного воздействия позволяет добиться лучшей сходимости результатов. Поэтому на рис. 14 представлены отклики газоразрядного устройства на воздействие длительностью 40 нс по уровню 0,5 и амплитудами 1, 2 и 4 кВ, полученные экспериментально и с помощью оптимизированной SPICE модели отдельно для каждого рассмотренного напряжения воздействия.

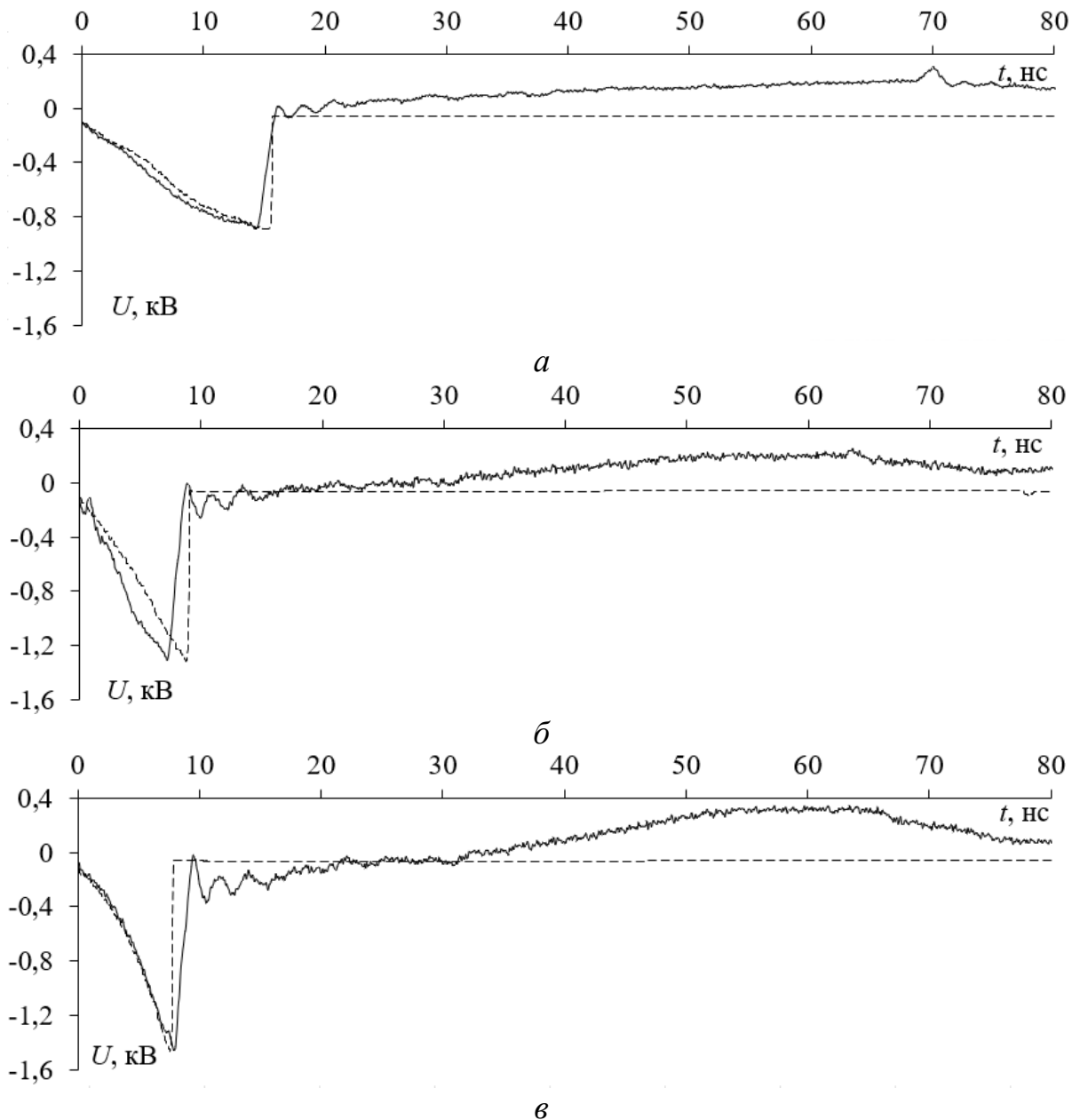


Рис. 14. Отклик газоразрядного устройства EC75X, полученный экспериментально (—) и с помощью оптимизированной SPICE модели (---) с учетом амплитуды воздействия 1 (а), 2 (б) и 4 (в) кВ

Из рис. 14 видно, что оптимизированные отдельно для рассмотренных воздействий SPICE модели хорошо согласуются с экспериментальными данными, при этом разница U_{max} не превышает 1%, а t_{cr} – 1,6 нс.

На основе полученных результатов сформулированы условия, которые необходимо выполнить для своевременного срабатывания газоразрядного устройства:

$$t_{\text{ср}} \leq t_{\Sigma}, \quad (9)$$

$$t_{\text{тг}} \leq \Delta t_{\text{max}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{тг}}$ – время, которое газоразрядник находится в режиме тления, Δt_{max} – наибольшая разница задержек близких друг к другу импульсов разложения. Условие (10) необходимо выполнить для оптимальной работы газоразрядного устройства при периодическом воздействии (или в ситуации, когда с выхода МЛ приходит множество импульсов, следующих друг за другом).

Результаты моделирования гибридных устройств

Сначала выбрано воздействие из рис. 4, но увеличенное до 50 кВ (далее в тексте воздействие 1). При моделировании использованы измеренные S -параметры структур 1 и 2 и исходная SPICE-модель газоразрядного устройства с измененными параметрами для более наглядных результатов: $V_b=100$ В, а $t_{\text{ср}}=15$ пс (далее SPICE-модель 2). На рис. 11 и рис. 12 представлены формы напряжения на выходе структур 1 и 2 с газоразрядным устройством на их выходе.

Из рис. 11 и рис. 12 видно, что СКИ раскладывается на множество импульсов, амплитуды большинства которых (после первого) значительно подавлены газоразрядным устройством. Это обусловлено тем, что первый импульс подготавливает газоразрядное устройство к срабатыванию, как и предполагалось. Когда газоразрядное устройство используется без линии, амплитуда составляет 2,53 кВ, а когда перед ним включены структуры 1 и 2 – 1,98 и 1,13 кВ соответственно.

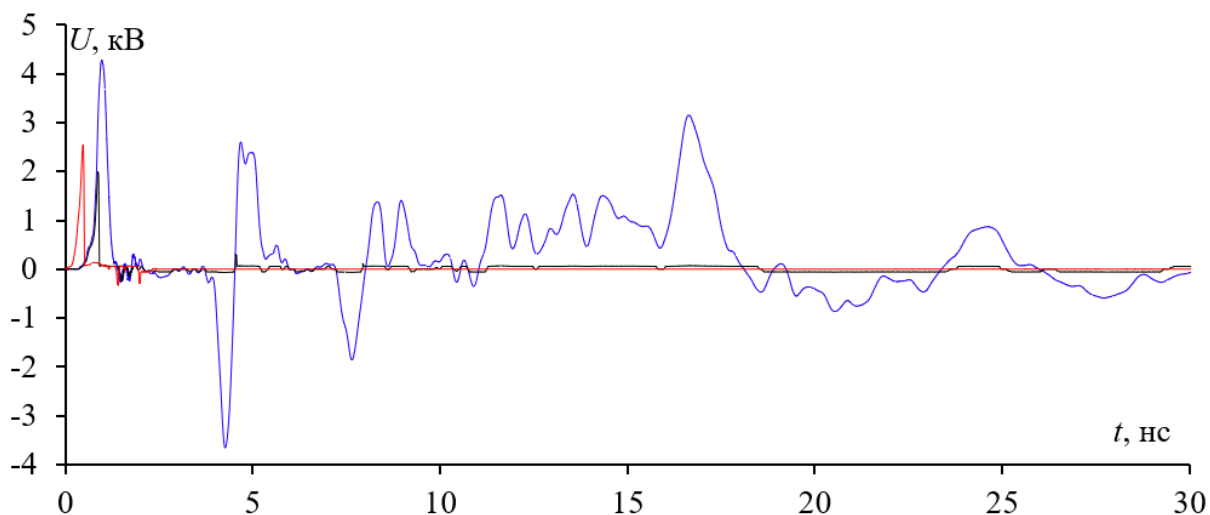


Рис. 11. Формы напряжения на выходе структуры 1 без газоразрядного устройства (—), с ним (—) и после срабатывания газоразрядного устройства без линии (—)

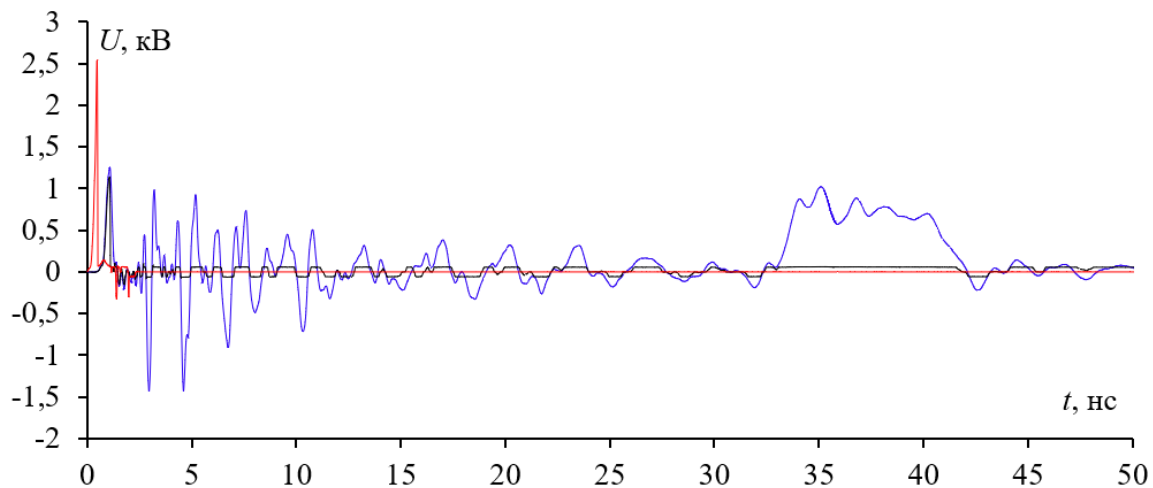


Рис. 12. Формы напряжения на выходе структуры 2 без газоразрядного устройства (—), с ним (—) и после срабатывания газоразрядного устройства без линии (—)

Из результатов, полученных выше, следует, что газоразрядному устройству требуется значительное время для срабатывания, в результате чего часть исходного воздействия (до $t_{ср}$) проходит дальше, например по линии передачи, при этом длительность прошедшей части воздействия значительно меньше исходного воздействия. Это возможно использовать для разложения этой прошедшей части воздействия в МЛ в целях уменьшения ее амплитуды, когда в МЛ не обеспечиваются требуемые задержки для разложения исходного воздействия (большей длительности). Поэтому рассмотрено включение газоразрядного устройства перед МЛ. При этом на выходе линии газоразрядное устройство будет отсутствовать. Вычислены формы напряжения на выходе структур 1 и 2, когда на их входе включено газоразрядное устройство. Для простоты такой вариант включения газоразрядного устройства далее будет называться вариантом 1, а при включении ЕС75Х на выходе линий – вариантом 2. Формы напряжения на выходе структур 1 и 2 (при использовании SPICE модели 2) представлены на рис. 13 и рис. 14.

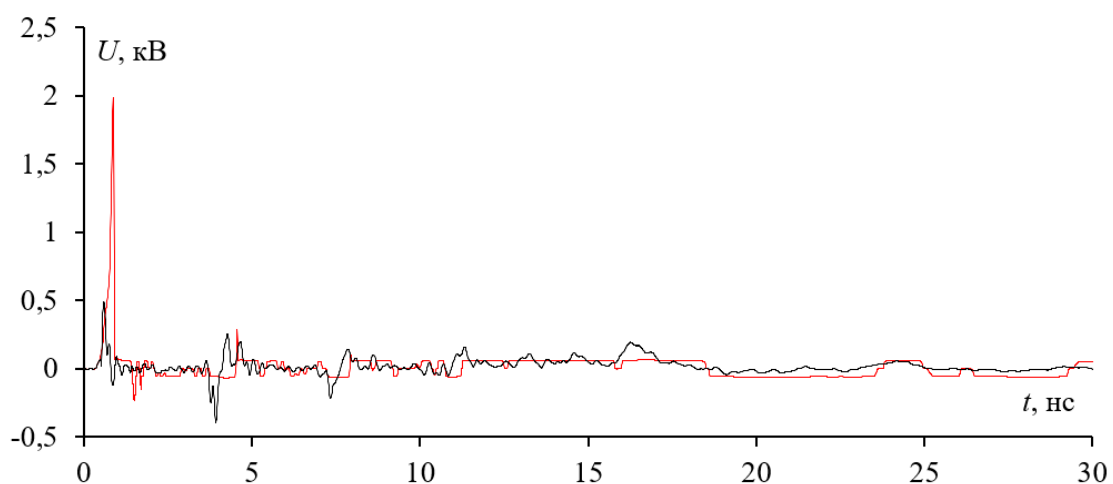


Рис. 13. Формы напряжения на выходе структуры 1 с вариантами включения газоразрядного устройства 1 (—) и 2 (—)

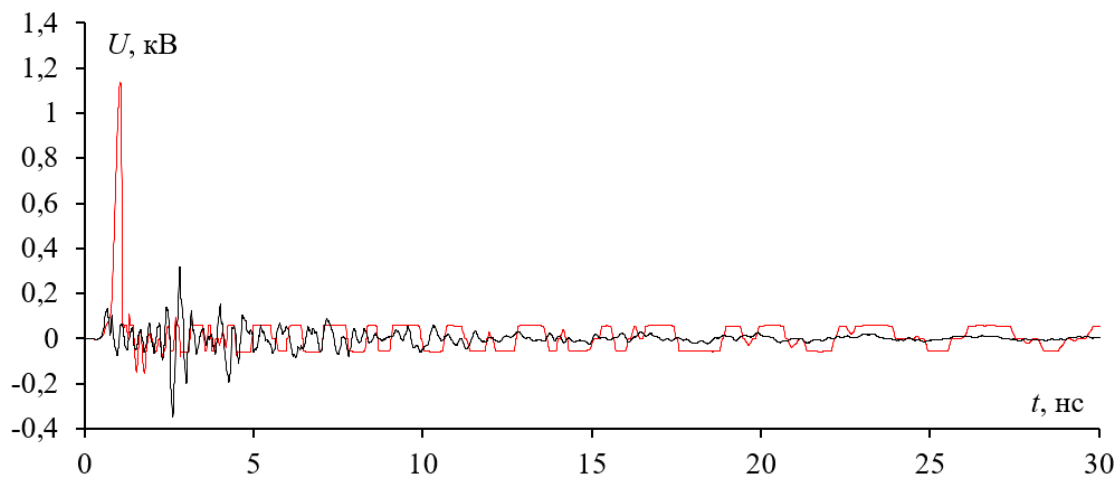


Рис. 14. Формы напряжения на выходе структуры 2 с вариантами включения газоразрядного устройства 1 (—) и 2 (—)

Из рис.13 и рис. 14 видно, что при первом варианте включения амплитуда на выходе гибридных устройств меньше. При этом она определяется как отрицательным импульсом, так и положительным, в зависимости от структуры. Так, амплитуда на выходе свернутой меандровой МПЛ с 1 и 2 вариантами включения газоразрядного устройства составляет 0,488 и 1,98 кВ соответственно, а на выходе свернутой меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками – минус 0,349 и 1,13 кВ.

Дополнительно выполнен аналогичный анализ на воздействие в виде трапеции с э.д.с. 8 кВ, длительностями фронта и спада по 0,5 нс, а плоской вершины 3 нс (далее в тексте воздействие 2). Для этого использованы измеренные S-параметры структур и SPICE модель 1 газоразрядного устройства. Формы напряжения на выходе структур для всех рассмотренных случаев представлены на рис. 15 и рис. 16.

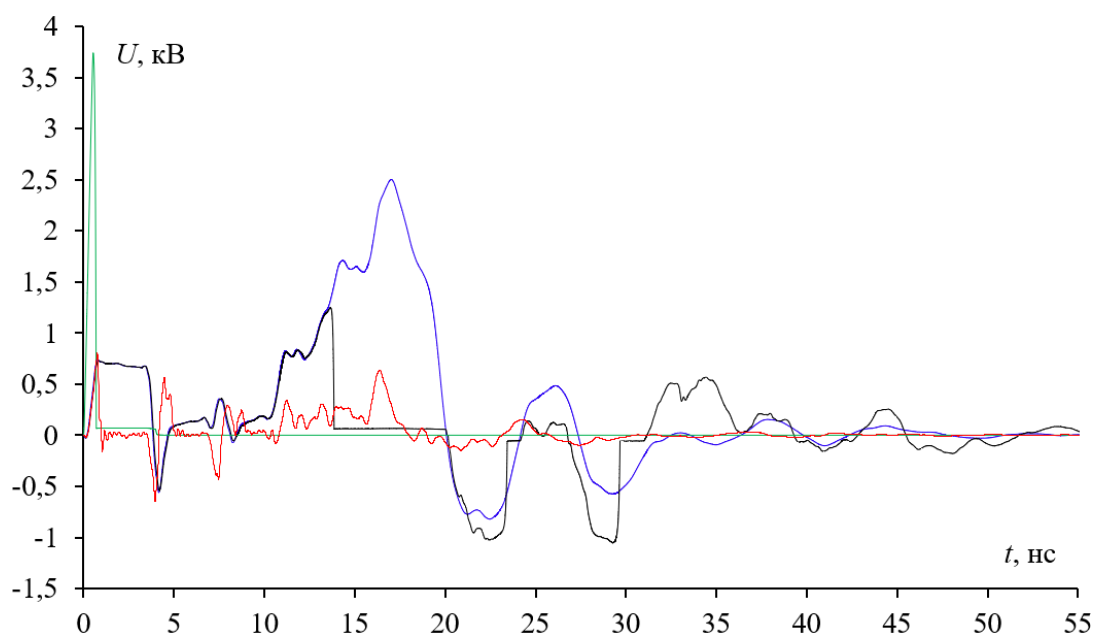


Рис. 15. Формы напряжения на выходе структуры 1 с газоразрядным устройством при вариантах включения 1 (—) и 2 (—), без газоразрядного устройства (—) и после газоразрядного устройства без МЛ (—)

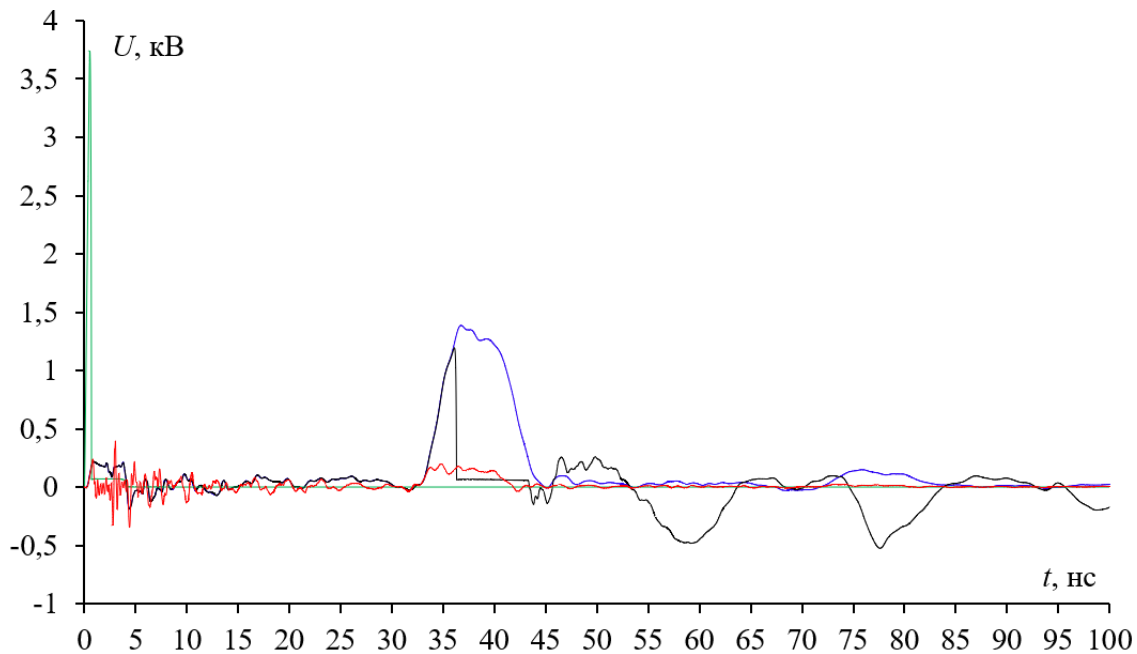


Рис. 16. Формы напряжения на выходе структуры 2 с газоразрядным устройством при вариантах включения 1 (—) и 2 (—), без газоразрядного устройства (—) и после газоразрядного устройства без МЛ (—)

Из рис. 15 и рис. 16 видно, что после включения с линиями газоразрядного устройства защитные характеристики улучшаются. Так, при использовании для защиты только газоразрядного устройства $U_{\max}=3,7$ кВ, структур 1 и 2 без газоразрядного устройства – 2,5 и 1,39 кВ соответственно, а при вариантах включения 1 и 2 – 801 и 392 В, и 1,25 и 1,2 кВ соответственно.

В таблицу 1 сведено ослабление (относительно $E/2$) для всех рассмотренных случаев, где случай 1 – линии без газоразрядного устройства, случай 2 – газоразрядное устройство без линий, случай 3 – газоразрядное устройство включено на входе линий, случай 4 – газоразрядное устройство включено на выходе линий.

Таблица 2 – Ослабление СКИ для всех рассмотренных случаев

Структура	Случай							
	1		2		3		4	
	Воздействие							
	1	2	1	2	1	2	1	2
Ослабление, раз								
1	5,6	1,6	19,7	1,07	102,46	5	25,15	3,2
2	19,9	2,9			143,27	10,2	44,05	3,35

Из таблицы 2 видно, что при включении газоразрядного устройства со структурами 1 и 2 ослабление рассмотренных воздействий увеличивается. При этом, как отмечалось выше, наилучший результат получен для случая, когда газоразрядное устройство включается перед входом в МЛ (ослабление до 143,27 раза). Максимальное ослабление получено для воздействия 2, поскольку

МЛ спроектированы с учетом его длительности, для его полного разложения в них. Воздействие 2 полностью не раскладывается в структурах 1 и 2, поэтому в них ослабление меньше. Кроме того, скорость нарастания воздействия 2 меньше, чем у воздействия 1, что значительно влияет на работу газоразрядного устройства. Для полного разложения воздействия 2 возможна дополнительная параметрическая оптимизация структур 1 и 2.

Заключение

Выполнен детальный анализ влияния длительности воздействия на защитные характеристики газоразрядного устройства посредством моделирования с использованием SPICE модели и натуральных испытаний. По результатам анализа оптимизирована SPICE-модель для более наглядных результатов, а также сформулированы условия для своевременного срабатывания газоразрядного устройства. В результате, на выходе МЛ с газоразрядным устройством увеличено ослабление СКИ, в сравнении с МЛ без газоразрядного устройства. Рассмотрены два различных воздействия и две структуры на основе МЛ. Продемонстрировано, как первый импульс с выхода линий подготавливает газоразрядное устройство к срабатыванию и остальные импульсы подавляются уже им. Несмотря на то, что в этом случае первый импульс (который подготавливает газоразрядное устройство к срабатыванию) проходит дальше и не ослабляется, его амплитуда все же меньше, чем амплитуда исходного импульса, а множество импульсов разложения в этом случае после него отсутствуют. Это важно для уменьшения нагрева чувствительных элементов РЭА. В этом случае максимальное ослабление СКИ в структурах 1 и 2 составило 25 и 44 раза соответственно. Дополнительно рассмотрен случай, когда газоразрядное устройство включено на входе в линию. Выявлено, что такое включение предпочтительнее для максимального подавления СКИ. В этом случае максимальное ослабление СКИ в структурах 1 и 2 составило 102 и 143 раза.

В дальнейшем видится перспективным аналогичное исследование, но с использованием более простой структуры, например меандровой МПЛ. Это позволит выполнить более наглядный анализ, практическую реализацию такого устройства и проведение натуральных испытаний.

Создание моделей выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 22-79-00103, моделирование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

Литература

1. Sabath F. A systematic approach for electromagnetic interference risk management // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. Vol. 6. No. 4. P. 99–106.

2. Parra N. M. Contribution to the study of the vulnerability of critical systems to intentional electromagnetic interference (IEMI). Ph.D dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016.

3. Radasky W. A. Fear of frying electromagnetic weapons threaten our data networks. Here's how to stop them // IEEE Spectrum. 2014. Vol. 51. No. 9. P. 46-51.

4. Nateghi A., Schaarschmidt M., Fisahn S., Garbe H. Susceptibility of power line communication (PLC) channel to ds, am and jamming intentional electromagnetic interferences // 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – Nusa Dua - Bali, Indonesia, 2021. P. 1–4.

5. Devaraj L., Ruddle A. R., Duffy A. P. Electromagnetic risk analysis for EMI impact on functional safety with probabilistic graphical models and fuzzy logic // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. 2020. Vol. 2. No. 4. P. 96–100.

6. Oakes B. D., Mattsson L.-G., Näsman P., and Glazunov A. A. A systems-based risk assessment framework for intentional electromagnetic interference (IEMI) on critical infrastructures // Risk Analysis. 2018. Vol. 38. No. 6. P. 1279–1305.

7. Белоусов А. О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 134-196.

8. Tsyantenka D., Mordachev V., Sinkevich E., Galenko A., Ma X., Guo W.-Q. UWB EMP susceptibility testing of general-purpose electronic, radio communication, and industrial equipment // 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – Nusa Dua - Bali, Indonesia, 2021. P. 1–4.

9. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61. No. 5. P. 546–550.

10. Packiaraj D., Vinoy K. J., Ramesh M., Kalghatgi A. T. Analysis of multi-conductor coupled microstrip lines with an aperture in the ground plane for the design of a broadband filter // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2013. Vol. 27. No. 7. P. 856–867.

11. He Y., Silva Z., Bergstedt Z., Faia J., Van Hoosier J., Goo Kang S., Shaffer G., Wheeler E., Cracraft M. Common-mode filtering in multilayer printed circuit boards // 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Washington, DC, 2017. P. 288–292.

12. Liu Q., Xu S., Pommerenke D. PCB structures for common mode suppression on differential microstrip lines // 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – Raleigh, NC, USA, 2014. P. 533–537.

13. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Russia, 2015. P. 175–177.

14. Response of telecom protection to three IEC waveforms / M.A. Messier [et al.] // Proc. of the 15th Int. Zurich Symp. on EMC, Zurich, Switzerland, Feb. 18–20, 2003. P. 127–132.

15. Malygin K.P., Nosov A.V. Experimental confirmation of ultrashort pulse decomposition in folded meander microstrip lines // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2024. Vol. 66. No. 2. P. 599-605. doi: 10.1109/TEMC.2023.3328551.

16. Malygin K.P., Nosov A.V., Kim G.Y. Attenuation of an ultrashort pulse in a folded meander microstrip line with two passive conductors // *International Journal of Circuit Theory and Applications*. 2023. Early View. P. 1–7. doi: 10.1002/cta.4015.

17. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Комнатнов М. Е., Суровцев Р. С. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение // *Наноиндустрия*. 2020. № 4s. Т. 13. С 366–369.

18. Zola J.G. Gas discharge tube modeling with pspice // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2008. Vol. 50. No. 4. P. 1022–1025. doi: 10.1109/TEMC.2008.2004808.

References

1. Sabath F. A systematic approach for electromagnetic interference risk management. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 99–106.

2. Parra N. M. Contribution to the study of the vulnerability of critical systems to intentional electromagnetic interference (IEMI). Ph.D dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016.

3. Radasky W. A. Fear of frying electromagnetic weapons threaten our data networks. Here's how to stop them. *IEEE Spectrum*, 2014, vol. 51, no. 9, pp. 46-51.

4. Nateghi A., Schaarschmidt M., Fisahn S., Garbe H. Susceptibility of power line communication (PLC) channel to ds, am and jamming intentional electromagnetic interferences. *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Nusa Dua - Bali, Indonesia, 2021. pp. 1–4.

5. Devaraj L., Ruddle A. R., Duffy A. P. Electromagnetic risk analysis for EMI impact on functional safety with probabilistic graphical models and fuzzy logic. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 2020, vol. 2, no. 4, pp. 96–100.

6. Oakes B. D., Mattsson L.-G., Näsman P., Glazunov A. A. A systems-based risk assessment framework for intentional electromagnetic interference (IEMI) on critical infrastructures. *Risk Analysis*, 2018, vol. 38, no. 6, pp. 1279–1305.

7. Belousov A. O. Approaches to ensuring electromagnetic compatibility of radioelectronic equipment as part of the EMI-based functional destruction means for unmanned aerial vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 134-196 (in Russian).

8. Tsyantenka D., Mordachev V., Sinkevich E., Galenko A., Ma X., Guo W.-Q. UWB EMP susceptibility testing of general-purpose electronic, radio communication,

and industrial equipment. *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Nusa Dua - Bali, Indonesia, 2021. pp. 1–4.

9. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 546–550.

10. Packiaraj D., Vinoy K. J., Ramesh M., Kalghatgi A. T. Analysis of multi-conductor coupled microstrip lines with an aperture in the ground plane for the design of a broadband filter. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013, vol. 27, no. 7, pp. 856–867.

11. He Y., Silva Z., Bergstedt Z., Faia J., Van Hoosier J., Goo Kang S., Shaffer G., Wheeler E., Cracraft M. Common-mode filtering in multilayer printed circuit boards, *2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, 2017, pp. 288–292.

12. Liu Q., Xu S., Pommerenke D. PCB structures for common mode suppression on differential microstrip lines. *2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Raleigh, NC, USA, 2014. pp. 533–537.

13. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Erlagol, Russia, 2015. pp. 175–177.

14. Nosov A. V., Surovtsev R. S., Gazizov T. R. Propagation of UWB pulse in two turns of meander microstrip line connected in cascade. *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, Tomsk, Russia, 2019. pp. 0288–0292.

15. Malygin K.P., Nosov A.V. Experimental confirmation of ultrashort pulse decomposition in folded meander microstrip lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2024, vol. 66, no. 2, pp. 599–605. doi: 10.1109/TEMC.2023.3328551.

16. Malygin K.P., Nosov A.V., Kim G.Y. Attenuation of an ultrashort pulse in a folded meander microstrip line with two passive conductors. *International Journal of Circuit Theory and Application*, 2023, Early View, pp. 1–7. doi: 10.1002/cta.4015.

17. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Komnatnov M. E., Surovtsev R. S. *Modelirovanie elementov kritichnoj radioelektronnoj apparatury: novye podhody, modeli i algoritmy, ih realizaciya i primenenie* [Simulation of radioelectronic equipment elements: new approaches, models and algorithms, their implementation and application]. *Nanoindustriya*, 2020, vol. 4s, no. 13, pp. 366–369 (in Russian).

18. Zola J.G. Gas discharge tube modeling with pspice. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, vol. 50, no. 4, pp. 1022–1025. doi: 10.1109/TEMC.2008.2004808.

Статья поступила 06 июня 2024 г.

Информация об авторах

Ким Георгий Юрьевич – аспирант кафедры телевидения и управления. Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость. E-mail: kimgeoju@gmail.com

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

Малыгин Константин Петрович – аспирант кафедры телевидения и управления. Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость. E-mail: malyginkp@gmail.com

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

Конов Владимир Юрьевич – кандидат физико-математических наук. Старший научный сотрудник лаборатории «Нелинейных электродинамических систем». Институт сильноточной электроники СО РАН. Область научных интересов: импульсная техника. E-mail: konev@lnes.hcei.tsc.ru

Адрес: 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, д. 2/3.

Жечев Евгений Сергеевич – кандидат технических наук. Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость. E-mail: evgenii.zhechev@tusur.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

Носов Александр Вячеславович – кандидат технических наук. Докторант. Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость. E-mail: alexns2094@gmail.com

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

Hybrid method of protection against ultrashort pulses based on a meander line and a gas-discharge device

G. Y. Kim, K. P. Malygin, E. S. Zhechev, V. Y. Konev, A. V. Nosov

Problem statement: with the development of radio electronic equipment (REE), its performance increases, operating voltages decrease and the routing density of printed circuit boards increases, which increases the susceptibility of REE to various electromagnetic influences (EMI). It is known that EMI can pose a threat to modern electronic equipment. Thus, generators of powerful electromagnetic waves can be used by attackers to destabilize or completely disable critical infrastructure. An ultrashort pulse (USP) poses a serious threat to REE. Traditional devices for protection against ultrasonic radiation are known, but they

have disadvantages: low power and speed, limited response life, and also low radiation resistance due to the semiconductor components in their composition. This is unacceptable, for example, for the space industry, due to the need to increase the active life of spacecraft to 15 years. In this regard, it is necessary to search for new approaches to the protection of electronic equipment that are free of such shortcomings. One of the promising approaches to protection is the decomposition of USP into a sequence of pulses of smaller amplitude in a meander line (ML). It is noteworthy that ML is used in conjunction with gas-discharge protection devices with insufficient speed, due to the fact that it takes considerable time for an electrical discharge to occur. For this reason, protected circuits in electronic devices must withstand interference until the device operates. In this regard, the impact of a powerful USP can be disastrous, since the gas-discharge device will not have time to operate due to the rapid increase in the USP. However, when using ML together with a gas-discharge device, this drawback can be eliminated. Thus, first the USP will be decomposed into a sequence of pulses of lower amplitude in the ML (up to 3 or even 4 pulses in one turn of the ML or more in multi-stage and multi-wire structures), the first of which, having passed through the gas-discharge device, can “prepare” it for operation, and the rest will already be limited by the gas-discharge device. At the same time, in order for the protected circuits to withstand the influence of the USP until the gas-discharge device operates, the USP in the ML can be decomposed into a sequence of pulses with increasing amplitude as each pulse arrives. Such a hybrid device will significantly improve the efficiency of protection of electronic equipment from short-duration pulses. **Purpose:** demonstrate the possibility of weakening SQUID in a hybrid protection device based on ML and a gas-discharge protection device. **Methods:** analysis, as well as computational (based on various numerical methods) and natural experiments. **Novelty:** a hybrid protection device against USP based on an ML and a gas-discharge device has been proposed, characterized by the joint use of their properties. In addition, the conditions for the decomposition of USP in such hybrid protection devices were formulated for the first time. **Results:** a detailed analysis of the USP duration of exposure on the protective characteristics of a gas-discharge device was performed through modeling using the SPICE model and full-scale tests. Based on the results of the analysis, the SPICE model was optimized for more visual results, and the conditions for timely operation of the gas-discharge device were formulated. As a result, at the output of the ML with a gas-discharge device, the attenuation of the USP is increased, in comparison with the ML, but without a gas-discharge device. Two different effects and two structures based on ML are considered. It is demonstrated how the first pulse from the output lines prepares the gas-discharge device for operation and the remaining pulses are suppressed by it. Despite the fact that in this case the first pulse (which prepares the gas-discharge device for operation) travels further and is not attenuated, its amplitude is still less than the amplitude of the initial pulse, and in this case there are no many decomposition pulses after it. This is important to reduce heating of the sensitive elements of the REE. In this case, the maximum attenuation of the USP in structures 1 and 2 was 25 and 44 times, respectively. Additionally, the case is considered when the gas-discharge device is connected at the input to the line. In this case, a remarkable result was obtained: it was revealed that such inclusion is most preferable for maximum suppression of USP. In this case, the maximum attenuation of the USP in structures 1 and 2 was 102 and 143 times. **Practical relevance:** the solution can be used in critical electronic equipment for protection against USP, for example, in power circuits.

Key words: ultrashort pulse, meander line, even mode, odd mode, electromagnetic compatibility, gas discharge device, interference protection.

Information about Authors

Georgy Yuryevich Kim – graduate student of the Department of Television and Control. Assistant professor at the research laboratory «Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility. E-mail: kimgoju@gmail.com

Address: Russia, 634045, Tomsk, Lenina prospekt, 40.

Malygin Konstantin Petrovich – graduate student of the Department of Television and Control. Assistant professor at the research laboratory «Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility. E-mail: malyginkp@gmail.com

Address: Russia, 634045, Tomsk, Lenina prospekt, 40.

Konev Vladimir Yurievich – Ph.D. of Physics and Mathematics Sciences. Senior researcher at the laboratory «Nonlinear Electrodynamical Systems». Institute of high-current electronics. Field of research: pulse technology. E-mail: konev@lnes.hcei.tsc.ru

Address: Russia, 634055, Tomsk, Academichesky prospekt, 2/3.

Zhechev Evgeniy Sergeevich – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior research officer at the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility. E-mail: evgenii.zhechev@tusur.ru

Address: Russia, 634045, Tomsk, Lenina prospekt, 40.

Alexander Vyacheslavovich Nosov – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral candidate. Senior research officer at the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility. E-mail: alexns2094@gmail.com

Address: Russia, 634045, Tomsk, Lenina prospekt, 40.