

Беляков Станислав Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: sbelyakov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; д.т.н.; профессор.

Израилов Лев Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: izrailev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185608305; кафедра информационных измерительных технологий и систем; магистрант.

Belyakov Stanislav Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: sbelyakov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Information Analytical Systems of Safety; dr. of eng. sc.; professor.

Izrailev Lev Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: izrailev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185608305; the Department of Information Measurement Technologies and Systems; master's student.

УДК 621.317.3

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-164-175

А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ

Молниевый разряд (МР), проходящий в ракету-носитель (РН), сопровождается прямым ударом по корпусу и, возникающими внутри корпуса, электромагнитными полями. Последние воздействуют на протяженные кабельные линии (КЛ) и наводят в них токи и напряжения. Это может приводить к запуску цепей пиротехнических устройств РН, срабатывание которых носит критический характер для функционирования бортового оборудования и для ракеты в целом. Их нештатное иницирование может приводить к катастрофическим последствиям. Амплитудно-временные параметры наводимых электромагнитных полей (ЭМП) достигают значений сотен кВ/м по электрическому полю и сотен кА/м по магнитному полю. Создание моделирующего комплекса для получения ЭМП с такими характеристиками в объеме, сопоставимом с размерами РН, представляет собой чрезвычайно сложную техническую задачу. Целью исследований явилось обоснование приемлемого, практически реализуемого способа натурного моделирования наведенных токов. Задачами исследований стали оценка возможности генерации электромагнитного поля заданных параметров, расчетная оценка токов и напряжений, наводимых молниевыми разрядами в кабельных линиях РН, схемное решение для разрабатываемой установки. Электромагнитные процессы, протекающие в кабельных линиях при воздействии на них токов молниевых разрядов, рассчитывались на основе решений уравнений Максвелла. Кабельные линии моделировались эквивалентными схемами замещения. Проведенные исследования показали, что для оценки стойкости РН к воздействию ЭМП молниевых разрядов целесообразно использовать комбинированный, расчетно-экспериментальный метод, при котором на первом этапе расчетным способом определяются прогнозируемые реакции протяженных кабельных линий РН на воздействия молниевых разрядов, а на втором этапе оборудование и устройства, подключенные к КЛ, нагружаются рассчитанными импульсами тока (напряжения) с помощью высоковольтного стенда молниевых разрядов. Использование данного подхода позволяет существенно упростить требования к испытательному оборудованию генерации электромагнитных полей, что обеспечит, в конечном итоге, безопасное применение пиротехнических устройств на борту ракеты-носителя в условиях молниевой активности.

Наведенный ток; пиропатрон; высоковольтный стенд молниевых разрядов; генератор импульсных токов; кабельная линия; стол заземления высоковольтный.

A.A. Yakovlev, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy

SIMULATION OF LIGHTNING STRIKE INDUCED CURRENTS AT MISSILERY SAMPLES TESTING

The lightning strike (LS) to launch vehicle (LV) is accompanied by direct impact on the airframe and electromagnetic (EM) fields occurring inside the airframe. The EM fields influence the extended power lines (PL) and induce currents and voltages in them. In this case, pyrotechnic circuits of LV might be actuated and thus damage critically the operation of airborne equipment and the vehicle itself. Their off-nominal ignition may lead to a catastrophe. The amplitude-time parameters of induced EM fields reach hundreds of kV/m and kA/m for electric and magnetic fields respectively. Constructing a simulation facility that is capable to produce EM fields with similar properties and size comparative to that of the LV becomes a tough technical challenge. The purpose of the research was to substantiate an acceptable, practi-

cally feasible method of full-scale modeling of induced currents. The research objectives were to evaluate the possibility of generating an electromagnetic field of specified parameters, to estimate the currents and voltages induced by lightning discharges in the PH cable lines, and to design a circuit solution for the installation under development. The electromagnetic processes occurring in cable lines when exposed to lightning discharge currents were calculated based on solutions to Maxwell's equations. The cable lines were modeled by equivalent substitution schemes. In this regard, it is considered reasonable to use a combined method of evaluation of LV tolerance to the impact of EM fields caused by lightning strikes; the method is meant to combine both calculation and experimental techniques. At the first stage, the expected response of extended power lines to EM fields is calculated, and the second stage implies loading the power line consumers with estimated current (voltage) pulses provided by high voltage test bench for lightning strike simulation. The use of this approach makes it possible to significantly simplify the requirements for test equipment for generating electromagnetic fields, which will ultimately ensure the safe use of pyrotechnic devices on board a launch vehicle in conditions of lightning activity.

Induced current; squib; high voltage test bench for lightning strike simulation; pulse current generator; power line; high-voltage grounding board.

Введение. Типовая компоновка РН предполагает, что полезная нагрузка располагается в его третьей ступени и защищена головным обтекателем. Как показывает опыт применения [1–8], именно головной обтекатель является наиболее поражаемым элементом конструкции РН при ударе МР. Под обтекателем проходят трассы бортового оборудования, в том числе управления пиропатронами.

Современная конструкция РН включает свыше двухсот пиропатронов (ПП), расположенных на всех трех ступенях. Наличие ПП является основной отличительной особенностью РН от образцов авиационной техники. Под кабельными линиями объекта, подверженными воздействию тока молнии, в данном случае рассматриваются кабельные линии цепей запуска пиротехнических устройств РН.

Таким образом, испытанию электромагнитным полем предстоит подвергать электрические контуры, расположенные внутри корпуса ракеты-носителя, в том числе контуры, содержащие ПП. Такие испытания должны предусматривать размещение кабельных жил, приборов и ПП (или их имитаторов) в изменяющемся электромагнитном поле, наводящем в электрических цепях ЭДС самоиндукции, которое в свою очередь создает наведенные токи в оболочках и жилах кабельных сетей. Наиболее ответственным моментом данного вида испытаний является фиксация величины тока, протекающего через нагревательные элементы ПП. Величина тока протекания не должна превосходить величины, гарантирующей несрабатывание ПП от наведенного тока. Предписываемая форма импульса магнитного поля показана на рис. 1. Кроме этого тестовый импульсный ток молнии, заданный требованиями руководящих документов [9–12], характеризуется малой длительностью времени фронта, одновременно с очень большим значением амплитуды импульса. При этом длительность импульса тока достигает значительной величины. Вследствие этого практически невозможно проведение прямых испытаний РН на стойкость к воздействию ЭМП, генерируемых молниевыми разрядами.

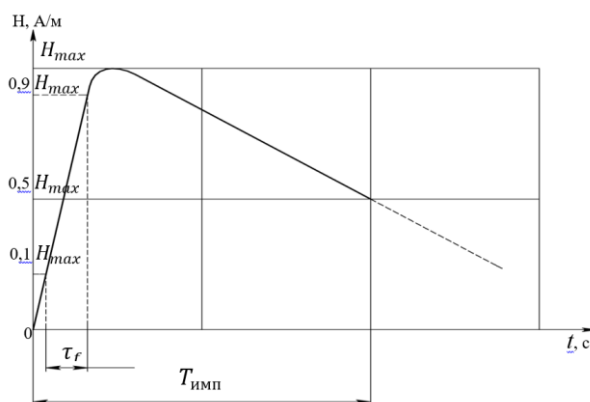


Рис. 1. Форма импульса магнитного поля

Оценка возможности генерации электромагнитного поля заданных параметров.

Проектирование оборудования для данного вида испытаний имеет следующие особенности:

- ♦ магнитное поле должно создаваться в объеме, достаточном для размещения испытываемых электрических контуров или их элементов;
- ♦ магнитное поле желательно иметь максимально равномерным по объему, в котором размещаются испытываемые электрические контуры;
- ♦ оборудование должно быть в максимальной мере унифицировано с оборудованием для испытаний электрическим полем;
- ♦ направление вектора магнитной индукции должно быть перпендикулярно направлению вектора напряженности электрического поля;
- ♦ приспособление для создания магнитного поля должно иметь минимальную индуктивность, так как только в этом случае можно приблизиться к требуемым параметрам.

Для создания магнитного поля предполагается использовать стол заземления высоковольтный (СЗВ) [13, 14], с подключением его пластин к генератору импульсного тока (ГИТ) [15–17].

При пропускании импульса тока по пластинам стола (рис. 2), между пластинами создается квазиравномерное магнитное поле, пропорциональное протекающим по пластинам току.

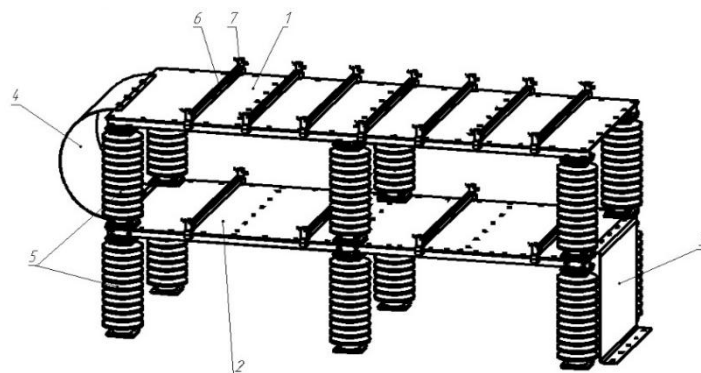


Рис. 2. Стол заземления высоковольтный: 1 – основание верхнее; 2 – основание нижнее; 3 – лист заземляющий; 4 – лист переходной; 5 – амортизаторы; 6 – направляющая шина; 7 – винт

Схема расчета магнитного поля между параллельными пластинами стола приведена на рис. 3.

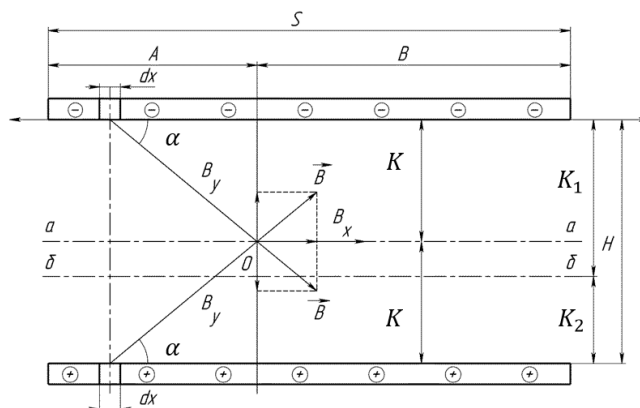


Рис. 3. Схема расчета магнитного поля между пластинами стола

Линия симметрии а-а характерна тем, что на ней вертикальные составляющая векторов магнитной индукции, создаваемые верхней и нижней пластиной, взаимно уничтожаются и имеет место только горизонтальная составляющая, которую в точке 0 можно определить по следующей зависимости [18]

$$dB = 2 \cdot \frac{\mu_0 I_0}{2\pi S r} \sin \alpha dx = \frac{\mu_0 I_0 K}{\pi S r^2} = \frac{\mu_0 I_0 K dx}{\pi S (X^2 + K^2)}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м; S – ширина пластины; r – расстояние от расчетной точки до проводника; $K_1 = K_2 = K$ – полученное выражение.

После интегрирования в обе стороны от проекции точки 0 на пластины по координате X выражение для вектора магнитной индукции в данной точке линии а-а имеет вид:

$$B = \frac{\mu_0 I_0 K}{\pi S} \int_0^A \frac{dx}{(X^2 + K^2)} + \frac{\mu_0 I_0 K}{\pi S} \int_0^B \frac{dx}{(X^2 + K^2)} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi S} \left(2 \operatorname{arctg} \frac{A}{K} + 2 \operatorname{arctg} \frac{B}{K} \right). \quad (2)$$

Величина магнитной индукции непостоянна и является функцией геометрического параметра равного

$$\Gamma = \operatorname{arctg} \frac{A}{K} + \operatorname{arctg} \frac{B}{K}. \quad (3)$$

Аналогичный расчет для значения горизонтальной составляющей вектора магнитной индукции для точек, лежащих на линии б-б произведен по выражению:

$$B = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi S} \left(\operatorname{arctg} \frac{A}{K_1} + \operatorname{arctg} \frac{B}{K_1} + \operatorname{arctg} \frac{A}{K_2} + \operatorname{arctg} \frac{B}{K_2} \right). \quad (4)$$

Геометрический параметр Γ в этом случае равен

$$\Gamma = \operatorname{arctg} \frac{A}{K_1} + \operatorname{arctg} \frac{B}{K_1} + \operatorname{arctg} \frac{A}{K_2} + \operatorname{arctg} \frac{B}{K_2}. \quad (5)$$

Результаты расчета в относительных величинах ширины пластины стола для параметров $K_1 = 0,2$, $K_2 = 0,4$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры пластин для стола заземления высоковольтного

A	B	$\operatorname{arctg} \frac{A}{K_1}$	$\operatorname{arctg} \frac{B}{K_1}$	$\operatorname{arctg} \frac{A}{K_2}$	$\operatorname{arctg} \frac{B}{K_2}$	Γ
1,0	0,0	1,19	0	1,37	0	2,56
0,9	0,1	1,15	0,24	1,35	0,46	3,20
0,8	0,2	1,11	0,46	1,33	0,79	3,69
0,7	0,3	1,05	0,64	1,29	0,98	3,96
0,6	0,4	0,98	0,79	1,25	1,11	4,13
0,5	0,5	0,90	0,90	1,19	1,19	4,18

Профили значений вектора магнитной индукции в безразмерных величинах для линии а-а и б-б, приведены на рис. 4.

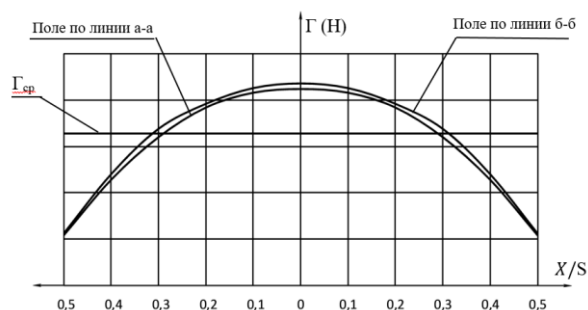


Рис. 4. Изменение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля по плоскости параллельной пластинам (в поперечном сечении)

Приведенные оценочные расчеты позволяют сделать следующие выводы.

Напряженность магнитного поля между пластинами стола заземляющего может быть оценена по зависимости

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi S} \Gamma, \quad (6)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость среды, для воздуха $\mu = 1$.

Потребный максимальный ток, который должен быть пропущен через пластины СЗВ, соответственно может быть определен по зависимости [19]

$$I_0 = \frac{H 2\pi S}{\Gamma_{\text{ср}}}, \quad (7)$$

где $\Gamma_{\text{ср}}$ – назначенное среднее значение геометрического параметра.

Располагать испытываемый контур целесообразно в средней плоскости между пластинами, где магнитное поле в наименьшей степени искажено вертикальной составляющей магнитной индукции.

При использовании в качестве средства генерации электромагнитного поля стола заземления высоковольтного, квазиравномерное электрическое поле может быть организовано между его пластинами по аналогии с полем плоского конденсатора.

Расчет параметров электрического контура, обеспечивающего заданные характеристики магнитного поля между пластинами стола заземления, для исходных данных $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, $H = 2,5 \cdot 10^3$ А/м, $L = 4$ мкГн, геометрическая характеристика $\Gamma = 3,6$, $S = 3$ м² – площадь пластин, $d = 0,6$ м, $\tau_f = 16,1$ мкс, $T = 1 \cdot 10^{-4}$ с дал следующие результаты:

напряжение зарядки конденсаторной батареи $U_0 = E_0 \cdot d = 5 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 3 \cdot 10^5$ В;

амплитуда тока $I_0 = \frac{2\pi H_0}{\Gamma} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{3,6} = 5\,233$ А;

емкость стола заземления $C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot \frac{3}{0,6} = 44,25 \cdot 10^{-12}$ Ф,

нагрузочное сопротивление $R_h = \frac{U_0}{I_0} = \frac{3 \cdot 10^5}{5233} = 57,4$ Ом.

потребная емкость конденсаторной батареи $C = -\frac{t}{R \ln 0,5} = \frac{10^{-4}}{57,4 \cdot 0,693} = 2,5$ мкФ.

Полученные результаты расчета показывают, что источник питания должен иметь напряжение не менее 300 кВ, то есть необходимо применение генератора импульсного напряжения (ГИН). При использовании в составе высоковольтного стенда молниевых разряда ГИН-800 [20], он может применяться для создания электромагнитного поля, но не удовлетворяет по располагаемой емкости конденсаторной батареи равной 0,25 мкФ, при этом имеет избыточное значение по напряжению.

Практическая реализация испытаний бортового оборудования путем генерации реальных электромагнитных полей с параметрами, указанными выше сопряжена со значительными научно-техническими проблемами, к которым можно отнести:

- ♦ регистрацию фактических величин сильных электромагнитных полей при проведении испытаний;
- ♦ обеспечение замеров наведенных токов в имитаторах ПП в условиях сильных помех;
- ♦ обеспечение стойкости нагрузочных сопротивлений, воспринимающих мощный токовый импульс;
- ♦ создание ГИН, работающего в двух различных режимах.

Решение указанных проблем является проблематичным, в связи с чем предлагается применить расчетный метод, позволяющей перейти от непосредственного воздействия электромагнитного поля, вызываемого МР, к наведенным токам, генерируемым в электрических контурах РН.

Расчетная оценка токов и напряжений, наводимых молниевыми разрядами в кабельных линиях РН. Для расчета амплитудно-временных параметров токов и напряжений, наводимых молниевыми разрядами в кабельных линиях, проложенных в корпусе

РН, необходимо определить их электрофизические характеристики. Кабельные линии, представляют собой электротехнические изделия, состоящие из проводных электрических цепей. В них необходимо рассматривать параметры цепей – «защитная оплетка кабеля (далее по тексту – экран) – металлоконструкции объекта (далее по тексту – корпус)», «жила – корпус» и «жила – экран».

Электромагнитные процессы, протекающие в кабельных линиях при воздействии на них токов молниевых разрядов, могут быть рассчитаны на основе решений уравнений Максвелла или телеграфных уравнений, являющихся следствием уравнений электродинамики.

$$\begin{cases} -\frac{\partial U_1}{\partial x} = R_1 I_1 + L_1 \frac{\partial I_1}{\partial t} + M \frac{\partial I_2}{\partial t} - E(x, t), \\ -\frac{\partial U_2}{\partial x} = R_2 I_2 + L_2 \frac{\partial I_2}{\partial t} + M \frac{\partial I_1}{\partial t} - E(x, t), \\ -\frac{\partial I_1}{\partial x} = G_{12}(U_1 - U_2) + C_{12} \frac{\partial (U_1 - U_2)}{\partial t}, \\ -\frac{\partial I_2}{\partial x} = G_{12}(U_2 - U_1) + C_{12} \frac{\partial (U_2 - U_1)}{\partial t} + G_2 U_2 + C_2 \frac{\partial U_2}{\partial t}, \end{cases} \quad (8)$$

где I_1, I_2 – токи в жилах и металлопокровах; U_1 – напряжения в цепях «жила – корпус» и «металлопокровы – корпус»; E – ЭДС, моделирующая поля разряда молнии по длине линии или токов молнии в области контакта канала молнии с корпусом РН; R_1, R_2 – погонные сопротивления жил и металлопокровов; L_1, L_2 – погонные индуктивности жил и защитных экранов; C_{12}, G_{12}, C_2, G_2 – погонные емкости и проводимости цепей «жила – металлопокровы» и «металлопокровы – корпус».

Схема замещения кабельных линий при воздействии полей приведена на рис. 5.

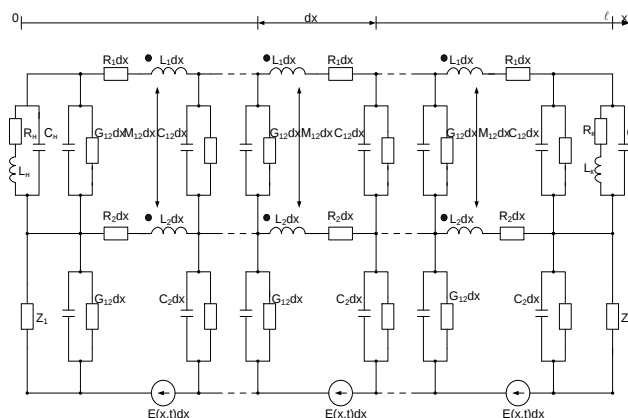


Рис. 5. Схема замещения кабельной линии, подверженной воздействию полей молниевых разрядов

В ней кабельные линии представляются как трехпроводные линии, состоящие из цепей «жила – корпус», «жила – металлопокровы» и «металлопокровы – корпус», а поля моделируются несколькими источниками ЭДС, которые распределяются по всей длине линии.

Решение системы уравнений (8) применительно к воздействиям молниевых разрядов производится во временной постановке, вследствие того, что электрофизические характеристики кабельных линий слабо зависят от спектра частот указанных воздействий. Максимальные величины токов и напряжений могут наводиться при условии прокладки КЛ вдоль корпуса РН (максимальное воздействие тока молнии). Длина КЛ принималась наибольшей из проложенных в РН и равной 28 м.

При расчете токов, наводимых в оплетке КЛ, учитывалось, что оплетка по концам соединена с корпусом РН. При расчете максимально возможных напряжений между оплеткой и корпусом РН принималось, что оплетка с одной стороны замкнута на корпус РН, а с другой – разомкнута.

Анализ результатов расчетов токов и напряжений, наводимых токами молнии в кабельных линиях объекта, показывает, что на оплетку КЛ цепей запуска пиротехнических устройств могут затекать токи амплитудой до 10А с длительностями импульсов до 100мкс и фронтом 1,5мкс (рис. 6), а также наводиться напряжения между оплеткой и корпусом с амплитудами до 2,1 В с длительностями импульсов до 100мкс и фронтом 0,5мкс.

В интересах придания стенду универсальности следует учитывать не только различия в параметрах объектов испытаний, но и предусмотреть необходимость определения фактических параметров импульсного тока, вызывающих срабатывание пиропатронов. В этой связи, при разработке технических решений по проектированию испытательной установки, предусмотрена возможность регулирования амплитуды импульсного тока в пределах от 10 до 100 А.

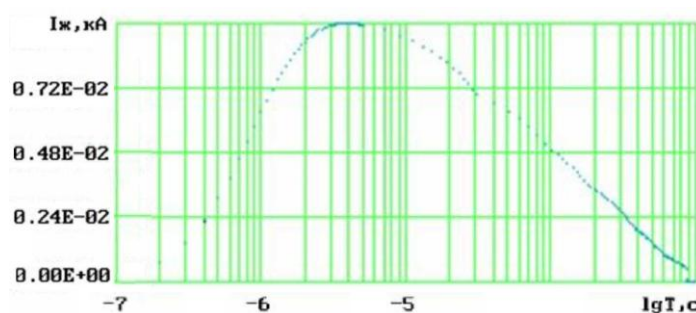


Рис. 6. Амплитудно-временная зависимость импульса тока, наводимого во внешней оплетке КЛ

Схемное решение для разрабатываемой установки. Испытательную установку предлагается создавать по принципу генератора импульсных токов на основе емкостного накопителя энергии (рис. 7).

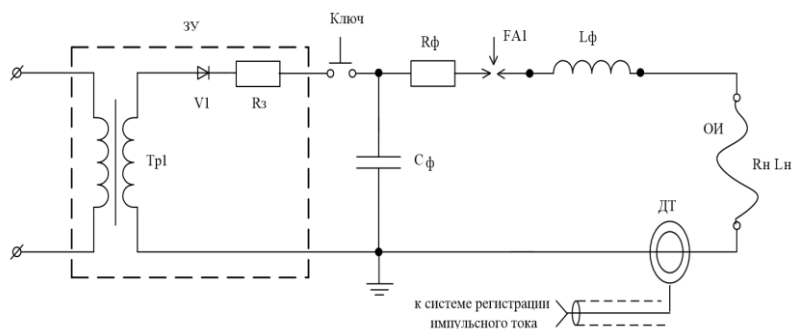


Рис. 7. Упрощенная принципиальная схема испытательной установки: ЗУ – зарядное устройство; Тр1 – трансформатор; V1 – вентиль высоковольтный; Rз – защитный резистор; Ключ – коммутатор подключения зарядного устройства к схеме; Сф – блок формирующий импульсных конденсаторов емкостного накопителя энергии; Rф – формирующий резистор; FA1 – управляемый коммутатор; Lф – формирующая индуктивность; ДТ – измерительный датчик тока; ОИ – объект испытаний

Был выполнен расчет параметров элементов схемы для апериодических процессов при 8 вариантах компоновки (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета параметров элементов схемы испытательной установки

№	C, мкФ	L, мкГн	R, Ом	U _c , В	I _{max} , А	τ _ф , мкс	τ _{0,5} , мкс
1	10,0	8,075 + 19,6	13,92 + 1,9	1419	86,28	4,25	118,00
2	5,0	16,150 + 19,6	27,85 + 1,9	2839	94,46	2,99	109,00
3	4,0	20,190 + 19,6	34,82 + 1,9	3548	93,82	2,71	107,70
4	3,0	26,920 + 19,6	46,43 + 1,9	4731	95,27	2,43	108,80
5	2,0	40,380 + 19,6	69,64 + 1,9	7097	96,78	2,13	103,90
6	1,0	80,760 + 19,6	139,29 + 1,9	14194	98,35	1,82	102,00
7	0,8	100,950 + 19,6	174,11 + 1,9	17743	98,68	1,76	101,60
8	0,6	134,600 + 19,6	232,10 + 1,9	23657	99,02	1,69	101,18

Анализ результатов расчета позволяет выбрать наиболее целесообразные варианты параметров элементов испытательной установки с точки зрения практической реализации схемных и конструктивных решений и показывает, что наиболее критичным параметром разрабатываемого ГИТ является его внутренняя индуктивность. Для исключения влияния на амплитудно-временные параметры импульсного тока, моделируемого установкой, необходимо обеспечить существенное превышение индуктивности ГИТ над индуктивностью объекта испытания. Поэтому наиболее приемлемым представляется вариант 5. Графическое отображение токового импульса для этого варианта приведено на рис. 8 и 9.

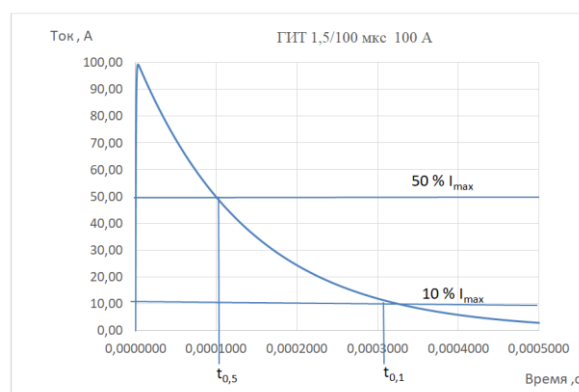


Рис. 8. Расчетная кривая импульсного тока; полная длительность импульса

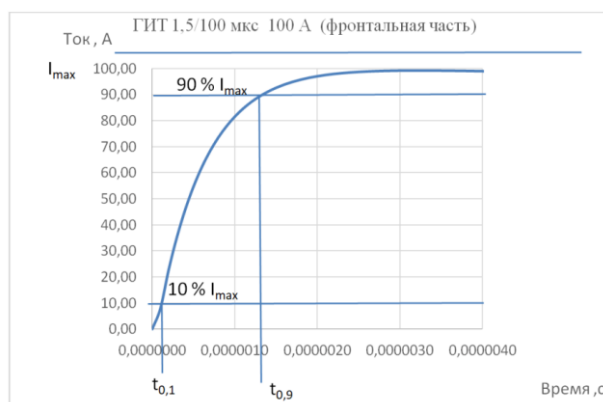


Рис. 9. Расчетная кривая импульсного тока; время нарастания фронта импульса

Конструктивное исполнение генератора ГИТ-ЭМП. Генератор импульсного тока электромагнитных полей расположен в низковольтной части стенда [21, 22] (рис. 10,а). В состав конструкции генератора импульсного тока для моделирования импульсного тока, наводимого при разрядах молнии в корпус РН в оболочках кабельных линий, входят следующие элементы: зарядное устройство; емкостной накопитель энергии (ЕНЭ); управляемый коммутатор; блок управления и измерения. Исполнение ГИТ-ЭМП имеет моноблочную конструкцию (рис. 10,б). Все элементы ГИТ размещены внутри корпуса стандартного металлического шкафа шириной 19". Зарядное устройство, емкостной накопитель энергии и управляемый коммутатор размещены на несущей конструкции из изоляционного материала, имеющего соответствующую диэлектрическую прочность.

Блок управления и измерения отделен от силовой части установки металлическим экраном, обеспечивающим снижение уровня помех, наводимых в цепях блока управления и измерения.

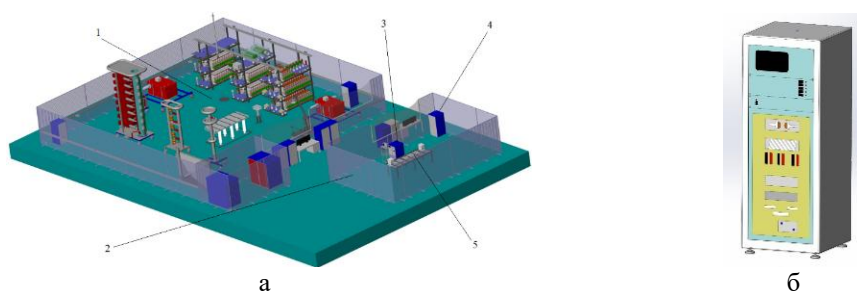


Рис. 10. Высоковольтный стенд молниевых разрядов: 1 – зона высоковольтных испытаний; 2 – зона низковольтных испытаний; 3 – AVI-3000; 4 – ГИТ-ЭМП; 5 – стол заземления высоковольтный

Зарядное устройство предназначено для заряда ЕНЭ и представляет собой высоковольтный трансформатор с выпрямителем и устройствами коммутации и заземления. Блок формирования предназначен для формирования амплитудно-временных параметров импульсов тока. Конструктивно, блок формирования представляет собой сборку из низкоиндуктивных резисторов объемного типа и высоковольтной катушки индуктивности. Управляемый коммутатор предназначен для управления разрядом ЕНЭ и представляет собой закрытый искровой разрядник тригatronного типа. Блок управления и измерения предназначен для контроля заряда и управления работой элементов ГИТ, а также для измерения и регистрации импульсного тока при проведении испытаний. В состав измерительной части блока управления входят измерительный импульсный трансформатор тока, цифровой запоминающий осциллограф, измерительные и информационные кабели.

Выводы:

1. В работе обоснован комбинированный расчетно-экспериментальный метод генерации наводимых в протяженных кабельных линиях токов и напряжений от электромагнитных полей молниевых разрядов. Исследования показали, что путь прямой имитации наведенных параметров приводит к необходимости применения генератора импульсного напряжения до 300 кВ. Готовый генератор типа ГИН-800 теоретически может быть применен, однако переразмерен по напряжению и не удовлетворяет по значению емкости конденсаторной батареи.

2. Рассчитаны необходимые параметры испытательной установки на базе разновидности ГИТ, семейство которых, во-первых, разработано в предыдущих работах и имеет типовую компонентную базу, а во-вторых, должен обеспечивать параметры, технически реализуемые на практике. Это напряжение зарядки конденсаторной батареи $U_0 = 3 \cdot 10^5$ В; амплитуда тока $I_0 = 5$ кА; емкость стола заземления $C = 50$ пФ, нагрузочное сопротивление $R_n = 58$ Ом, потребная емкость конденсаторной батареи $C = 2,5$ мкФ. Моделирование

различных вариантов параметров элементов испытательной установки позволило выбрать оптимальный вариант, обеспечивающий заданные значения фронта нарастания импульсного тока и его длительности.

3. Вновь создаваемый ГИТ-ЭМП встраивается в общую компоновку испытательного комплекса – высоковольтного стенда молниевых разрядов, работы по созданию которого находятся в завершающей фазе. Дальнейшие усилия целесообразно сосредоточить на разработке программ и методик испытаний, проведению натурных испытаний с использованием ГИТ-ЭМП и интерпретации результатов по оценке правильности принятых решений на теоретическом уровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обработка и анализ случаев поражения самолетов гражданской авиации разрядами атмосферного электричества. Отчет о НИР № ГР80059418, Инв. № Б887910. – Рига: ГосНИИ ЭР АТ ГА, 1980. – 88 с.
2. *Uman M.A.* Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards // *Proceedings of the IEEE*. – 1988. – Vol. 76, No. 12. – P. 1548-1565. – DOI: 10.1109/5.16349.
3. *Phillpoy J.* Lightning strike // *Flight International*. – 1972. – No. 3316. – P. 114-156.
4. *Plumer J.A., Perry B.L.* An Analysis of Lightning strikes in Airline Operation in the USA and Europe // *Conference on Lightning and static Electricity, England, April 14-17, 1975*. – P. 502-513.
5. *Aufbauer H.* Atmosphärische Entladungen auf Luftfahrzeuge // *Electrotechn und Maschinenbau*. – 1978. – No. 9. – P. 417-421.
6. *Scully Robert.* Lightning Protection for the Orion Space Vehicle NASA: Johnson Space Centre. Houston, Texas. – 77058-3696. – (Professional English). – Text: direct, 10 p.
7. *Bachelier E., Issac F., Quenum W., Enjabert V., Mohedano L.* Lightning Protection of SOYUZ and VEGA launching pads // *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria*. – 6 p.
8. Молния ударила в ракету «Союз» при старте с Плесецка. 27 мая 2019. – URL: <https://tass.ru/proisshestiya/6475178> (дата обращения 18.01.2021).
9. КТ-160D. Квалификационные требования РФ. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. – М.: Госстандарт РФ, 2004.
10. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – P. 1-56.
11. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – P. 1-145.
12. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
13. *Яковлев А.А., Серов М.Ю., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Моделирование электрических характеристик разрядного контура высоковольтного стенда молниевых разрядов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 3 (239). – С. 252-265.
14. *Яковлев А.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Стендовое обеспечение испытаний изделий ракетно-космической техники искусственным молниевым разрядом и настройка параметров оборудования // *Тр. «НПЦАП». Системы и приборы управления*. – 2024. – № 2 (68). – С. 46-59.
15. *Бурлуцкий С.Г., Голосий А.С., Ковалев А.П., Сахабудинов Р.В.* Оценивание характеристик токовых генераторов имитации молниевых разрядов // *Тр. ВКА им. А.Ф.Можайского*. – 2022. – Вып. 682. – С. 171-182.
16. *Шишков Д.В., Яковлев А.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Расчет параметров токовых импульсов в разрядных контурах высоковольтного стенда молниевых разрядов // *Сб. материалов научно-технической конференции «Моделирование параметров атмосферы при применении систем вооружения»*. – Королев: ФГБУ «4 ЦНИИ» Минобороны России, 2022. – С. 47-51.
17. *Серов М.Ю., Яковлев А.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Параметрический анализ результатов расчета испытательных импульсов в эквивалентных контурах ГИТ-А, ГИТ-Д, ГИТ-ВС // *Сб. докладов ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А.Гагарина»*, 23-25 ноября 2022. – С. 222-226.
18. *Баранов М.И.* Избранные вопросы электрофизики: монография. В 3 т. Т. 2. Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Точка, 2010. – 407 с.
19. *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 223 с.

20. Система испытания импульсным напряжением ГИН-800кВ/80кДж. ТУ-ЦАЕИ-010217ГИН. – ООО «НПП «Электромаш». – Новочеркасск, 2019.
21. Овчинникова Н.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С. Создание стендов моделирования прямого и косвенного воздействия молниевых разрядов на элементы ракетно-космической техники // Сб. докладов Пятой Международной научной конференции «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии», 4-20 апреля 2024. – СПб.: ГУАП, 2024. – С. 111-115.
22. Патент на изобретение №2834247. Высоковольтный стенд молниевых разрядов и способ испытаний на воздействие молний / Голосий А.С., Самаркин А.Л., Сахабудинов Р.В., Торицын И.В., Яковлев А.А. Приоритет изобретения 10 июля 2024 г.

REFERENCES

1. Obrabotka i analiz sluchaev porazheniya samoletov grazhdanskoy aviatsii razryadami atmosfernogo elektrichestva. Otchet o NIR № GR80059418, Inv. № B887910 [Processing and analysis of cases of civil aviation aircraft damage by atmospheric electricity discharges. Research report No. GR80059418, Inv. No. B887910]. Riga. GosNII ER AT GA, 1980, 88 p.
2. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards, *Proceedings of the IEEE*, 1988, Vol. 76, No. 12, pp. 1548-1565. DOI: 10.1109/5.16349.
3. Phillpoy J. Lightning strike, *Flight International*, 1972, No. 3316, pp. 114-156.
4. Plumer J.A., Perry B.L. An Analysis of Lightning strikes in Airline Operation in the USA and Europe, *Conference on Lightning and static Electricity, England, April 14-17, 1975*, pp. 502-513.
5. Aufbauer H. Atmosphärische Entladungen auf Luftfahrzeuge, *Electrotechn und Maschinenbau*, 1978, No. 9, pp. 417-421.
6. Scully Robert. Lightning Protection for the Orion Space Vehicle NASA: Johnson Space Centre. Houston, Texas. 77058-3696. (Professional English). Text: direct, 10 p.
7. Bachelier E., Issac F., Quenum W., Enjabert V., Mohedano L. Lightning Protection of SOYUZ and VEGA launching pads, *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria*, 6 p.
8. Molniya udarila v raketu «Soyuz» pri startе s Plesetska. 27 maya 2019 [Lightning strikes Soyuz rocket during launch from Plesetsk. May 27, 2019]. Available at: <https://tass.ru/proisshestiya/6475178> (accessed 18 January 2021).
9. KT-160D. Kvalifikatsionnye trebovaniya RF. Usloviya ekspluatatsii i okruzhayushchey sredy dlya bortovogo aviatsionnogo oborudovaniya. Trebovaniya, normy i metody ispytaniy [KT-160D. Qualification requirements of the Russian Federation. Operating and environmental conditions for onboard aviation equipment. Requirements, standards and test methods]. Moscow: Gos-standart RF, 2004.
10. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013, pp. 1-56.
11. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013, pp. 1-145.
12. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
13. Yakovlev A.A., Serov M.Yu., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Modelirovanie elektricheskikh kharakteristik razryadnogo kontura vysokovol'tnogo stenda molnievogo razryada [Modeling of electrical characteristics of the discharge circuit of a high-voltage lightning discharge stand], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3 (239), pp. 252-265.
14. Yakovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Stendovoe obespechenie ispytaniy izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki iskusstvennym molnievym razryadom i nastroyka parametrov oborudovaniya [Stand support for testing rocket and space technology products with an artificial lightning discharge and setting up equipment parameters], *Tr. «NPTSAP». Sistemy i pribory upravleniya* [Proceedings of the Scientific and Practical Center of Aerospace Engineering. Control systems and devices], 2024, No. 2 (68), pp. 46-59.
15. Burlutskiy S.G., Golosiy A.S., Kovalev A.P., Sakhabudinov R.V. Otsenivanie kharakteristik toko-vykh generatorov imitatsii molnievykh razryadov [Evaluation of characteristics of current generators for simulating lightning discharges], *Tr. VKA im. A.F.Mozhayskogo* [Proceedings of the A.F. Mozhaysky Military Space Academy], 2022, Issue. 682, pp. 171-182.
16. Shishkov D.V., Yakovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Raschet parametrov tokovykh impul'sov v razryadnykh konturakh vysokovol'tnogo stenda molnievogo razryada [Calculation of parameters of current pulses in discharge circuits of a high-voltage lightning discharge stand], *Sb. materialov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie parametrov atmosfery pri primeneniі sistem vooruzheniya»* [Collection of materials of the scientific and technical conference "Modeling of atmospheric parameters when using weapons systems"]. Korolev: FGBU «4 TSNIL» Minoborony Rossii, 2022, pp. 47-51.

17. Serov M.Yu., Yakovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Parametricheskii analiz rezul'tatov rascheta ispytatel'nykh impul'sov v ekvivalentnykh konturakh GIT-A, GIT-D, GIT-VS [Parametric analysis of the results of calculating test pulses in the equivalent circuits of GIT-A, GIT-D, GIT-VS], *Sb. dokladov VUNTS VVS «VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina», 23-25 noyabrya 2022* [Collection of reports of the Military Scientific Center of the Air Force "VVA named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", November 23-25, 2022], pp. 222-226.
18. Baranov M.I. Izbrannyye voprosy elektrofiziki: monografiya [Selected issues of electrophysics: monograph], *In 3 Vol. 2. Book 2 Teoriya elektrofizicheskikh effektiv i zadach* [Theory of electrophysical effects and problems] [Theory of electrophysical effects and problems]. Khar'kov: Tochka, 2010, 407 p.
19. Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I. Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity [Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 223 p.
20. Sistema ispytaniya impul'snym napryazheniem GIN-800kV/80kDzh. TU-TSAEI-010217GIN. ООО «NPP «Elektromash» [GIN-800 kV/80 kJ impulse voltage testing system. TU-CAEI-010217GIN]. Novocherkassk, 2019.
21. Ovchinnikova N.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Sozdanie stendov modelirovaniya pryamogo i nepryamogo vozdeystviya molnievogo razryada na elementy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Creation of stands for simulating direct and indirect impact of lightning discharge on elements of rocket and space technology], *Sb. dokladov Pyatoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatatsionnye tekhnologii», 4-20 aprelya 2024* [Collection of reports of the Fifth International Scientific Conference "Aerospace Instrumentation and Operational Technologies", April 4-20, 2024]. Saint Petersburg: GUAP, 2024, pp. 111-115.
22. Golosiy A.S., Samarkin A.L., Sakhabudinov R.V., Toritsyn I.V., Yakovlev A.A. Patent na izobretenie №2834247. Vysokovol'tnyy stend molnievogo razryada i sposob ispytaniy na vozdeystvie molniy [Patent for invention No. 2834247. High-voltage lightning discharge stand and method for testing for lightning impact]. Priority of invention July 10, 2024.

Яковлев Александр Анатольевич – АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79052500726; к.т.н.; начальник управления.

Сахабудинов Роман Владиславович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: sahabudinov@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79211852881; к.т.н.; доцент.

Голосий Александр Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213025903; к.т.н.; доцент.

Yakovlev Aleksandr Anatolievich – ARSENAL DESIGN BUREAU JSK; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79052500726; cand. of eng. sc.; head of Department.

Sakhabudinov Roman Vladislavovich – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: stapler1@yandex.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79211852881; cand. of eng. sc.; associate professor.

Golosiy Aleksandr Sergeevich – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396.965.2

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-175-184

А.Н. Бакуменко, В.Т. Лобач

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАЛОВЫСОТНОГО МЕТОДА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Статья посвящена разработке и исследованию нового метода маловысотного профилирования отражающей поверхности с использованием радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), который позволяет получать радиолокационные изображения с высоким разрешением как по дальности, так и вдоль линии пути. В документе детально рассматриваются теоретические основы функционирования РСА систем, особенности формирования и обработки сигналов, а