

Козловский Александр Вячеславович – Южный федеральный университет; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79888980779; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Мельник Эдуард Всеволодович – e-mail: evmelnik@sfedu.ru; тел.: +78632184000, кафедра вычислительной техники; профессор.

Самойлов Алексей Николаевич – e-mail: asamoylov@sfedu.ru; тел.: +78632184000; кафедра вычислительной техники; зав. кафедрой.

Kozlovskiy Alexander Vyacheslavovich – Southern Federal University; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79888980779; the Department of Computer Engineering; assistant.

Melnik Eduard Vsevolodovich – e-mail: evmelnik@sfedu.ru; phone: +78632184000; the Department of Computer Science; professor.

Samoylov Aleksey Nikolayevich – e-mail: asamoylov@sfedu.ru; phone: +78632184000; the Department of Computer Science; head of the Department.

УДК 621.317.3

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-252-265

А.А. Яковлев, М.Ю. Серов, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДНОГО КОНТУРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СТЕНДА МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА**

Устойчивое прохождение ракетой-носителем атмосферного слоя, где могут возникать разряды электричества, обеспечивается не только организационными мерами, но и предварительными наземными испытаниями. Государства, осуществляющие вывод космических аппаратов на орбиту, располагают специальным стендовым оборудованием. Сложилась определенная система взглядов, реализованная в стандартах и других технических документах, требования которых стали обязательны к выполнению. Настоящая работа является логическим продолжением исследований, связанных с созданием высоковольтного стенда молниевого разряда (ВСМР), разрабатываемого для испытаний изделий ракетно-космической техники. Основной задачей ВСМР является генерация заданных электрических (или электромагнитных) импульсов, имитирующих воздействие молниевого разряда на элементы конструкции ракето-носителя. В высоковольтной части ВСМР состоит из четырех генераторов импульсных токов (ГИТ-А, ГИТ-В, ГИТ-С и ГИТ-Д), последовательно подключаемых к нагрузке для создания определённой формы общего токового импульса. Типовые нагрузки включают: стол заземления высоковольтный, стойку вертикальную, приспособление на испытание пробоем. Задачей настоящего этапа работ явилась проверка параметров токового импульса, возникающего при разряде генератора импульсных токов ГИТ-А на калибровочную нагрузку, в качестве которой принимается стол заземления высоковольтный. В статье представлены результаты расчетов параметров импульса компоненты «А» в разрядном контуре в ходе развития процесса генерации импульса: до момента закоротки емкостного накопителя и от момента закоротки. Разрядное устройство «кроубар» позволяет подключать нагрузку по двухконтурной схеме в момент максимума разрядного тока. Разработаны аналитические зависимости обеих эквивалентных электрических схем подключения контуров. Дифференциальные уравнения решены численным методом, получены графики изменения тока и напряжения колебательного импульса «А» в незакороченном и закороченном контурах. Моделирование позволило оценить динамические характеристики исследуемого контура при его функционировании в одном из самых быстропотекающих и энергоемких режимов работы. В целом коммутация разрядного контура на стенд заземления высоковольтный с подобранными параметрами подтверждает работоспособность ВСМР и достижение удовлетворительных характеристик заданного токового импульса, реализуемого ГИТ-А.

Молниевый разряд; высоковольтный стенд молниевого разряда; генератор импульсных токов; закоротка; емкостной накопитель; импульс; кроубар; электрический контур; максимум тока; индуктивность.

A.A. Yakovlev, M.Yu. Serov, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy

REVEALING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE DISCHARGE CIRCUIT FOR A HIGH-VOLTAGE LIGHTNING DISCHARGE STAND

The steady passage through the atmospheric layer by the launch vehicle where electricity discharges may occur is ensured not only by performance measures, but also by preliminary ground tests. The countries to be carrying out the launch of spacecraft into the orbit have special bench equipment. A particular system of points views has developed to be implemented in standards and other documents, and the given requirements have become obligatory to meet. The current paper is a following part of the research related to the creation of a high-voltage lightning discharge stand which is being developed for testing rocket and space technology products. The main task of this device is the generation of given electric (or electromagnetic) pulses that simulate the effect of lightning discharge on the structural elements of the launch vehicle. There are four pulse current generators in the high-voltage part such as (pulse current generator-A, pulse current generator-B, pulse current generator-C, pulse current generator-D-types), sequentially connected to the load to create a certain form of a common current pulse. Routine loads include: high-voltage grounding table, vertical rack, breakdown testing device. The task of this stage of work was to check the parameters of the current pulse that occurs when the pulse current generator-A discharges to the calibration load to be the high-voltage grounding table. The article illustrated the calculating findings of the pulse parameters of component A-type in the discharge circuit through the development of the pulse generation process: before the moment of short-circuiting of the capacitive storage and from the moment of short-circuiting. The discharge device such as crowbar allows you to connect the load according to a two-circuit circuit at the time of the maximum discharge current. Analytical dependencies of both equivalent electrical circuits of circuits are covered in the article. Differential equations are solved by numerical method, graphs of change of current and voltage of oscillatory pulse A-type in open and closed circuits are obtained. The given activity as well as the calculations made it possible to evaluate the dynamic characteristics of the studied circuit during its operation in one of the fastest flowing and energy-intensive modes of operation. In general, the switching of the discharge circuit to the high-voltage grounding stand with the selected parameters confirms the operability of the VSMR and the achievement of satisfactory characteristics of the given current pulse implemented by the A-type.

Lightning discharge; high-voltage lightning discharge stand; pulse current generator; short circuit; capacitive accumulator; pulse; crowbar; electric circuit; current maximum; inductance.

Введение. Начиная с 60-х годов прошлого столетия, в мире резко увеличилось количество научно-исследовательских работ как по физике молниевых разрядов (МР), так и по его взаимодействию с различного рода техническими средствами (ТС) [1–4]. В первую очередь такими ТС являются авиация и ракетно-космическая техника. Это вызвано тем, что эти ТС наиболее часто попадают в область грозовой деятельности [5, 6], а иногда даже могут инициировать образование молниевых разрядов. Эти работы были значительно интенсифицированы в последующие годы, так как на смену малочувствительным к МР электромеханическим и электронным устройствам пришли микроэлектронные устройства (МЭУ). Эти МЭУ, ввиду своей слабостойкости, оказались чрезвычайно чувствительны к электромагнитным помехам и, в первую очередь, к электромагнитным помехам прямых и косвенных молниевых разрядов.

Проведенный анализ воздействия молниевых разрядов показал [7, 8], что на 2000–2500 летных часов приходится один прямой удар МР в летательный аппарат. Поэтому в авиации накоплен огромный опыт парирования последствий воздействия на самолеты молниевых разрядов. В отличие от воздушных судов применение ракетно-космической техники (РКТ), имеет ряд особенностей:

- ◆ время прохождения ракеты-носителя (РН) через опасную зону (примерно 12000 м) составляет от 20 до 60 с;
- ◆ возможен перенос пуска РН при опасном грозовом прогнозе;
- ◆ большинство пусков РН проходят в беспилотном режиме;
- ◆ РН используют двухкомпонентное топливо, вероятность его воспламенения при ударе в топливный бак несколько ниже, чем для авиационного топлива;
- ◆ большинство внешних радиоустройств РН используются в интересах телеметрии и их выход из строя, при ударе МР, не приводит к аварии РН.

Эти обстоятельства и особенности, казалось бы, снижают опасность поражения РН молниевым разрядом, но имеют место ряд существенных факторов, переводящих риски в разряд критически значимых и недопустимых:

- ♦ экономические последствия катастрофы РН могут быть чрезвычайно велики, так как ее стоимость вместе с полезной нагрузкой может достигать миллиардов рублей;
- ♦ экологические последствия катастрофы РН могут быть масштабны, особенно при использовании топлив с высококипящими окислителями;
- ♦ конструкция РН, как правило, включает большое количество пироустройств, несанкционированное срабатывание которых ведет к неизбежной аварии;
- ♦ стартующая РН является мощным источником электромагнитных возмущений, что увеличивает вероятность возникновения МР.

Несмотря на принимаемые организационные и технические меры, защита РКТ от воздействия МР продолжает оставаться насущной проблемой. В 1987 году, при старте с космодрома на мысе Канаверал, в результате удара молнии, была потеряна ракета-носитель АС-67 [9, 10]. В мае 2019 года при старте с космодрома Плесецк, на 14 с полета, молния ударила в РН «Союз-2.1б» [11].

Компетентные в этом вопросе органы в государствах с активной космической деятельностью проводят предварительные натурные испытания объектов авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость. Виды и амплитудно-временные параметры (АВП) электромагнитных помех МР чрезвычайно разносторонни, но все же удалось их систематизировать в несколько типичных видов, которые и были заложены в нормативные документы по молниестойкости. При этом в США накопленный опыт кристаллизован в виде руководящих технических документов SAE ARP 5412: 2013 [12] и SAE ARP 5416: 2013 [13], которые определяют требования к нормированным АВП импульсов тока искусственной молнии. Международный стандарт IEC 62305-1 2010 [14] регламентирует требования к характеристикам тока искусственной молнии, характерного для короткого грозового удара в защищаемый наземный объект и применяемого при испытаниях объектов на молниестойкость. На территории РФ порядок испытаний на молниезащиту воздушных судов регламентирован международными квалификационными требованиями КТ-160D (G) [15] и некоторыми другими документами.

Для проведения испытаний оборудования РКТ на молниестойкость создается специализированный высоковольтный стенд молниевых разрядов [16, 20]. В настоящее время разработан технический облик, проведены расчеты и спроектированы компоненты ВСМР [17–19].

Самой трудной проблемой при испытаниях являются испытания высокими токами. Заданная КТ-160D (G) форма обобщенного токового импульса молниевых разрядов приведена на рис. 1. Наиболее сложным является реализация компонент А и D, особенно А, у которого фронт нарастания составляет не более 50 мкс, а пиковая амплитуда 200 ± 20 кА.

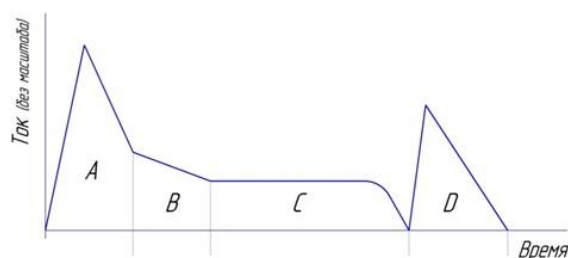


Рис. 1. Форма токового импульса в соответствии с КТ-160D (G)

У генератора тока искусственной молнии УИТОМ-1, созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «Харьковский политехнический институт», достигнуты следующие амплитудно-временные параметры компоненты А: амплитуда тока 212 кА, длительность фронта нарастания 32 мкс [21, 22].

Техническая платформа генераторов импульсных токов (ГИТ) компонент А и D отечественного высоковольтного стенда молниевых разрядов приведена на рис. 2.

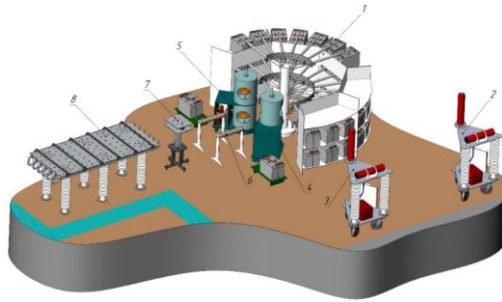


Рис. 2. Общий вид ГИТ-А и ГИТ-Д с нагрузкой (стол заземления высоковольтный):
1 – ёмкостной накопитель энергии ГИТ-А и ГИТ-Д; 2 – высоковольтное зарядное устройство накопителя энергии ГИТ-А; 3 – высоковольтное зарядное устройство накопителя энергии ГИТ-Д; 4 – управляемый коммутатор/кроубар А; 5 – управляемый коммутатор/кроубар Д; 6 – блоки формирования импульсов А и Д; 7 – коллектор; 8 – стол заземления высоковольтный

Задачами настоящей работы являются:

- ♦ расчет параметров токового импульса, возникающего при разряде ГИТ-А на калибровочную нагрузку;
- ♦ оценка достижимости с помощью ВСМР заданных параметров токового импульса наиболее энергоемкой компоненты А.

Логика формирования высоковольтного импульса. Нагрузка ГИТ-А, ГИТ-Д, ГИТ-ВС настраивается при конфигурировании оборудования с помощью блоков формирования. Настройка заключается в подборе индуктивности формирующих катушек и сопротивления формирующих резисторов с целью обеспечения оптимальных для подачи импульса значений общей индуктивности и общего активного сопротивления разрядного контура.

Генератор ГИТ-А выдает импульс в режиме «crowbar» («кроубар»). Основным вариантом применения данного метода является соединение при помощи специального замыкателя (разрядного устройства) насколько возможно накоротко разнополярных выводов емкостного накопителя (ЕН) энергии в момент максимума разрядного тока.

В итоге импульс логически состоит из двух частей: начальной части, с быстрым фронтом в колебательном режиме по одноконтурной схеме (рис. 3), и завершающей части, после шунтирования ЕН, в идеале обеспечивающей аperiodический разряд, по двухконтурной схеме (рис. 6) с более сложным процессом разряда.

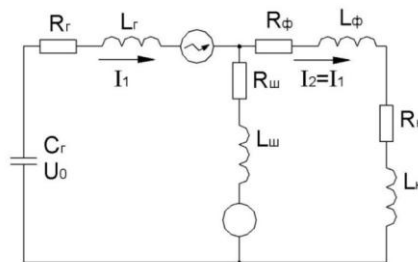


Рис. 3. Схема контура до закоротки: I_1 – ток разряда ЕН (функция времени); I_2 – ток в цепи нагрузки (функция времени); C_r – емкость ЕН; U_0 – начальное значение напряжения зарядки ЕН; L_r – собственная индуктивность генератора с учетом индуктивности запускающего разрядника; L_ϕ – индуктивность формирующей цепи; L_n – индуктивность нагрузки; $L_{ш}$ – индуктивность шунтирующей цепи с учетом шунтирующего разрядника; R_r – собственное омическое сопротивление генератора с учетом запускающего разрядника; R_ϕ – омическое сопротивление формирующей цепи; R_n – омическое сопротивление нагрузки; $R_{ш}$ – омическое сопротивление шунтирующей цепи с учетом шунтирующего разрядника

При разряде генератора тока ГИТ-А импульс поступает на калибровочную нагрузку, в качестве которой принимается стол заземления высоковольтный (рис. 4).

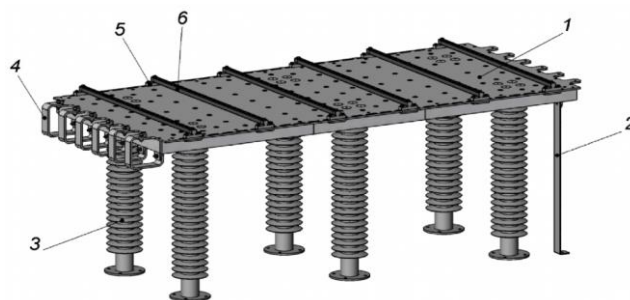


Рис. 4. Стол заземления высоковольтный: 1 – основание; 2 – заземляющая шина; 3 – изолятор; 4 – скоба соединительная; 5 – кронштейн; 6 – направляющая

Стол заземления высоковольтный (СЗВ) предназначен для проведения испытаний бортового оборудования и элементов конструкции РН на прямое воздействие молний. Прямое воздействие молнии (удар) характеризуется плавкой и испарением материалов и узлов конструкции летательного аппарата, разрывами большой площади поверхности (обшивки), электрическим напряжением конструкции, горением, подрывом, выгоранием (обжогом поверхности) и выработкой огромной ЭДС. Объектом испытаний являются элементы конструкции РН, наружная аппаратура. Основой СЗВ является сэндвич, состоящий из двух алюминиевых листов, расположенных один над другим и изолированных друг от друга.

Расчет параметров импульса компоненты А в разрядном контуре до момента закоротки ЕН. Расчетная электрическая схема разряда ЕН до включения разрядника шунтирующей цепи приведена на рис. 3.

В начальный момент времени

$$I = I_1 = I_2 - \text{разрядный ток в контуре (зависит от времени);} \quad (1)$$

U – напряжение на ЕН (зависит от времени);

$$L = L_g + L_\phi + L_n - \text{общая индуктивность контура;} \quad (2)$$

$$R = R_g + R_\phi + R_n - \text{общее омическое сопротивление контура.} \quad (3)$$

Переходный процесс в разрядном контуре описывается уравнениями:

$$U - RI - LI' = 0. \quad (4)$$

$$I = CU', \quad (5)$$

$$U = U_0 - \frac{1}{C_r} \int Idt. \quad (6)$$

Данные уравнения приводятся к виду

$$I'' = -\frac{1}{CL}I - \frac{R}{L}I', \quad (7)$$

$$U'' = -\frac{1}{CL}U - \frac{R}{L}U'. \quad (8)$$

Для определения начальных условий используются обозначения:

I_0 – начальное для расчета значение тока разряда ЕН;

I'_0 – начальное для расчета значение первой производной тока разряда ЕН;

U_0 – начальное для расчета значение напряжения ЕН;

U'_0 – начальное для расчета значение первой производной напряжения ЕН.

В момент $t = 0$ мкс

$$I_0 = 0 \text{ А}, \quad U_0 = 80 \text{ кВ}, \quad U'_0 = 0 \text{ В/с}, \quad I'_0 = U_0/L = 1,143 \cdot 10^{10} \text{ А/с.} \quad (9)$$

Исходные данные для расчета начальной части импульса А:

$$U_0 = 80 \text{ кВ}, \quad C_r = 100,8 \text{ мкФ}, \quad L_r = 2,0 \text{ мкГн}, \quad L\phi = 4,4 \text{ мкГн}, \quad L_n = 0,6 \text{ мкГн},$$

$$L_{ш} = 0,1 \text{ мкГн}, \quad R_r = 0,005 \text{ Ом}, \quad R\phi = 0,12 \text{ Ом}, \quad R_n = 0,005 \text{ Ом}, \quad R_{ш} = 0,1 \text{ Ом}.$$

При этом

$$L = L_r + L\phi + L_n = 7,0 \text{ мкГн}, \quad (10)$$

$$R = R_r + R\phi + R_n = 0,13 \text{ Ом}. \quad (11)$$

Дифференциальные уравнения второго порядка для тока (7) и для напряжения ЕН (8) с указанными начальными условиями решены методом Рунге-Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом в программе PTC Mathcad Prime 3.0. Графики изменения тока и напряжения показаны на рис. 5 (время по оси X – в микросекундах).

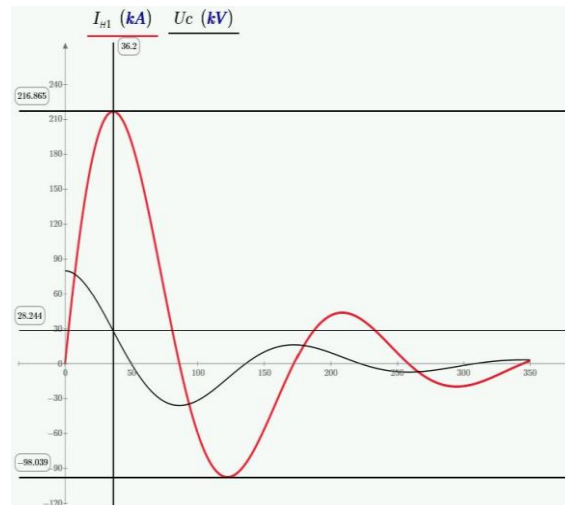


Рис. 5. Графики тока в нагрузке и напряжения ЕН

Из графиков изменения тока и напряжения колебательного импульса А в незакороченном контуре (рис. 5) следует:

- ♦ целесообразное время включения шунтирующего разрядника – время максимума тока $t = 36,2 \text{ мкс}$;
- ♦ величина максимального разрядного тока $I_{\max} = 216,8 \text{ кА}$;
- ♦ величина остаточного напряжения ЕН в момент максимума тока $U_{\text{ост}} = 28,2 \text{ кВ}$.

Следует отметить, что для достижения определенных параметров импульса момент включения шунтирующего разрядника может быть смещен, что является элементом регулировки.

Расчет параметров импульса от момента закоротки ЕН. На рис. 6 представлена схема разрядного контура после закоротки ЕН.

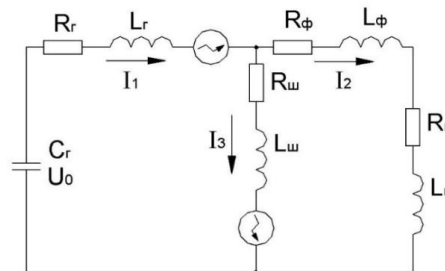


Рис. 6. Схема разрядного контура

Обозначения элементов разрядного контура на рис.6 и в последующих формулах: I_1 – ток разряда ЕН (функция времени); I_2 – ток в цепи нагрузки (функция времени); I_3 – ток в шунтирующей цепи (функция времени); C_Γ – емкость ЕН; U_0 – начальное значение напряжения зарядки ЕН; L_Γ – собственная индуктивность генератора с учетом индуктивности запускающего разрядника; L_Φ – индуктивность формирующей цепи; L_H – индуктивность нагрузки; $L_{ш}$ – индуктивность шунтирующей цепи с учетом шунтирующего разрядника; R_Γ – собственное омическое сопротивление генератора с учетом запускающего разрядника; R_Φ – омическое сопротивление формирующей цепи; R_H – омическое сопротивление нагрузки; $R_{ш}$ – омическое сопротивление шунтирующей цепи с учетом шунтирующего разрядника.

Процесс разряда в контуре описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ U_0 - \frac{1}{C_\Gamma} \int I_1 dt - L_\Gamma I_1' - R_\Gamma I_1 - L_{ш} I_3' - R_{ш} I_3 = 0 \\ -L_\Phi I_2' - R_\Phi I_2 - L_H I_2' - R_H I_2 + L_{ш} I_3' + R_{ш} I_3 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Поскольку

$$I_3 = I_1 - I_2, \quad (13)$$

то

$$\begin{cases} U_0 - \frac{1}{C_\Gamma} \int I_1 dt - L_\Gamma I_1' - R_\Gamma I_1 - L_{ш} (I_1' - I_2') - R_{ш} (I_1 - I_2) = 0 \\ -L_\Phi I_2' - R_\Phi I_2 - L_H I_2' - R_H I_2 + L_{ш} (I_1' - I_2') + R_{ш} (I_1 - I_2) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Продифференцировав первое уравнение системы и сгруппировав подобные члены

$$\begin{cases} -\frac{1}{C_\Gamma} I_1 - (L_\Gamma + L_{ш}) I_1'' - (R_\Gamma + R_{ш}) I_1' + L_{ш} I_2'' + R_{ш} I_2' = 0 \\ -(L_\Phi + L_H + L_{ш}) I_2' - (R_\Phi + R_H + R_{ш}) I_2 + L_{ш} I_1' + R_{ш} I_1 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Приведем систему к виду, где в левой части ее уравнений будут вторые производные токов, а в правой токи и их первые производные. Одновременно обозначим коэффициенты при членах уравнений

$$A = \frac{1}{C_\Gamma}, \quad (16)$$

$$B = L_\Gamma + L_{ш}, \quad (17)$$

$$C = R_\Gamma + R_{ш}, \quad (18)$$

$$D = L_{ш}, \quad (19)$$

$$E = R_{ш}, \quad (20)$$

$$F = L_\Phi + L_H + L_{ш}, \quad (21)$$

$$G = R_\Phi + R_H + R_{ш}, \quad (22)$$

$$H = L_{ш}, \quad (23)$$

$$J = R_{ш}. \quad (24)$$

Тогда

$$\begin{cases} -AI_1 - BI_1'' - CI_1' + DI_2'' + EI_2' = 0 \\ -FI_2' - GI_2 + HI_1' + JI_1 = 0 \end{cases} \quad (25)$$

После дифференцирования второго уравнения в системе (25)

$$\begin{cases} -AI_1 - BI_1'' - CI_1' + DI_2'' + EI_2' = 0 \\ -FI_2'' - GI_2' + HI_1'' + JI_1' = 0 \end{cases} \quad (26)$$

После преобразования первого уравнения (умножив на F и разделив на D):

$$-\frac{AF}{D}I_1 - \frac{BF}{D}I_1'' - \frac{CF}{D}I_1' + FI_2'' + \frac{EF}{D}I_2' = 0 \quad (27)$$

После сложения полученного выражения (27) со вторым уравнением в системе уравнений (26):

$$-\frac{AF}{D}I_1 - \frac{BF}{D}I_1'' - \frac{CF}{D}I_1' + \frac{EF}{D}I_2' - \underline{\underline{GI_2'}} + \underline{\underline{HI_1''}} + \underline{\underline{JI_1'}} = 0 \quad (28)$$

$$I_1'' = \frac{\left[-\frac{AF}{D}I_1 - \left(\frac{CF}{D} - J \right) I_1' + \left(\frac{EF}{D} - G \right) I_2' \right]}{\left(\frac{BF}{D} - H \right)} \quad (29)$$

После аналогичных преобразований и для второго уравнения из системы уравнений (26):

$$I_2'' = \frac{\left[-\left(\frac{GB}{H} - E \right) I_2' + \left(\frac{JB}{H} - C \right) I_1' - AI_1 \right]}{\left(\frac{FB}{H} - D \right)} \quad (30)$$

Уравнения (29) и (30) составляют систему в преобразованном виде:

$$\begin{cases} I_1'' = -\frac{AF}{D\left(\frac{BF}{D} - H\right)}I_1 - \frac{\left(\frac{CF}{D} - J\right)}{\left(\frac{BF}{D} - H\right)}I_1' + \frac{\left(\frac{EF}{D} - G\right)}{\left(\frac{BF}{D} - H\right)}I_2' \\ I_2'' = -\frac{\left(\frac{GB}{H} - E\right)}{\left(\frac{FB}{H} - D\right)}I_2' + \frac{\left(\frac{JB}{H} - C\right)}{\left(\frac{FB}{H} - D\right)}I_1' - \frac{A}{\left(\frac{FB}{H} - D\right)}I_1 \end{cases} \quad (31)$$

Упорядочив коэффициенты при членах система в окончательном виде имеет вид:

$$\begin{cases} I_1'' = -\frac{AF}{(BF - DH)}I_1 - \frac{(CF - DJ)}{(BF - DH)}I_1' + \frac{(EF - DG)}{(BF - DH)}I_2' \\ I_2'' = -\frac{(BG - EH)}{(BF - DH)}I_2' + \frac{(BJ - CH)}{(BF - DH)}I_1' - \frac{AH}{(BF - DH)}I_1 \end{cases} \quad (32)$$

Для решения был также применен метод Рунге-Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом в программе PTC Mathcad Prime 3.0.

Определения начальных условий для расчета. Исходную систему (1) можно представить в виде

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ U_C - L_I I_1' - R_I I_1 - L_{III} I_3' - R_{III} I_3 = 0 \\ -L_{\Phi} I_2' - R_{\Phi} I_2 - L_{II} I_2' - R_{II} I_2 + L_{III} I_3' + R_{III} I_3 = 0 \end{cases} \quad (33)$$

где

$$U_C = U_0 - \frac{1}{C_r} \int I_1 dt \quad (34)$$

После преобразований

$$\begin{cases} U_C - BI_1' - CI_1 + DI_2' + EI_2 = 0 \\ -FI_2' - GI_2 + HI_1' + JI_1 = 0 \end{cases} \quad (35)$$

Полученная в общем виде система (35) при подстановке известных величин позволяет рассчитать значения первых производных токов в начальный момент. Для момента закоротки известны величины токов и остаточного напряжения. Подставив их значения в систему, получим:

$$\begin{cases} U_{OCT} - BI_{10}' - CI_{10} + DI_{20}' + EI_{20} = 0 \\ -FI_{20}' - GI_{20} + HI_{10}' + JI_{10} = 0 \end{cases} \quad (36)$$

где I_{10}' – значение первой производной тока разряда ЕН в момент закоротки;

I_{20}' – значение первой производной тока в цепи нагрузки в момент закоротки;

I_{10} – значение тока разряда ЕН в момент закоротки (известно);

I_{20} – значение тока в цепи нагрузки в момент закоротки (известно);

U_{OCT} – остаточное напряжение ЕН в момент закоротки (известно).

Решим второе уравнение системы (36) относительно производной тока I_{20}'

$$I_{20}' = \frac{(-GI_{20} + HI_{10}' + JI_{10})}{F}, \quad (37)$$

и, подставив в первое уравнение, получим:

$$I_{10}' = \frac{F}{(BF - DH)} U_{OCT} - \frac{(CF - DJ)}{(BF - DH)} I_{10} - \frac{(DG - EF)}{(BF - DH)} I_{20}, \quad (38)$$

Подставив (38) в (37) и упростив, имеем

$$I_{20}' = \frac{H}{(BF - DH)} U_{OCT} - \frac{(GB - HE)}{(BF - DH)} I_{20} - \frac{(HC - JB)}{(BF - DH)} I_{10}. \quad (39)$$

Два последних выражения (38) и (39) определяют значения производных токов в момент закоротки.

Результаты моделирования. На рис. 7 приведены графики токов после закоротки (по двухконтурной схеме), полученные расчетом в программе PTC Mathcad Prime 3.0 методом Рунге-Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом (время по оси X – в микросекундах).

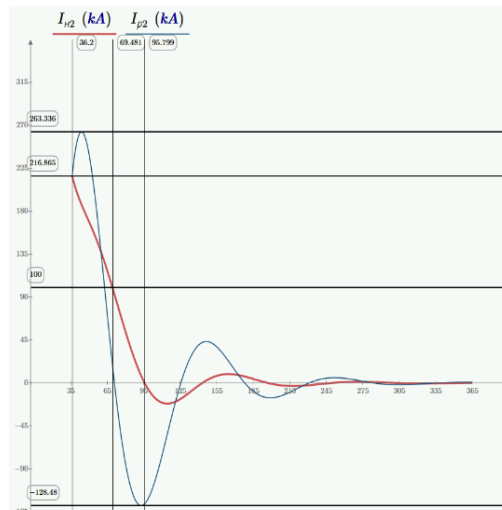


Рис. 7. Графики токов разряда ЕН I_{p2} (I_1 в формулах) и в цепи нагрузки I_{n2} (I_2 в формулах)

В результате закорачивания ЕН в момент максимума тока емкостной накопитель разряжается через цепь шунтирования в колебательном режиме, а энергия, запасенная в формирующей катушке индуктивности и общей индуктивности нагрузочной части контура, рассеивается на общем сопротивлении участков цепи. В зависимости от нагрузки в контуре и линии шунтирования нагрузочный ток спадает быстро, либо с небольшими колебаниями, либо аperiodически.

При исходных данных $U_0 = 80$ кВ, $C_{\Gamma} = 100,8$ мкФ, $L_{\Gamma} = 2,0$ мкГн, $L\phi = 4,4$ мкГн, $L_n = 0,6$ мкГн, $L_{ш} = 0,1$ мкГн, $R_{\Gamma} = 0,005$ Ом, $R\phi = 0,12$ Ом, $R_n = 0,005$ Ом, $R_{ш} = 0,1$ Ом, в результате моделирования получен график результирующего импульса, приведенный на рис. 8.

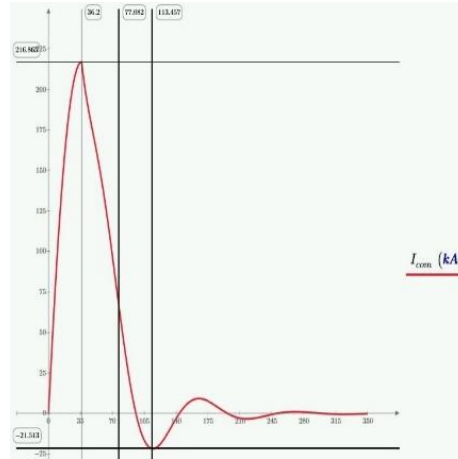


Рис. 8. Ток импульса А, полученного методом "crowbar". Закоротка ЕН в момент максимума тока

Максимум разрядного тока $I_{max} = 216,8$ кА будет достигнут в момент времени $t = 36,2$ мкс (время нарастания фронта). При этом остаточное напряжение ЕН $U_{ост} = 28,2$ кВ, $I'_{10} = 1,269 \cdot 10^{10}$ А/с, $I'_{20} = -5,066 \cdot 10^9$ А/с.

На рис. 9 приведен график накопления интеграла действия импульса А с закороткой ЕН в момент максимума тока.

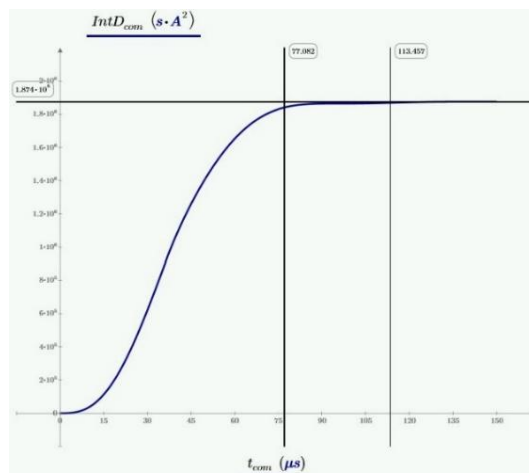


Рис. 9. График накопления интеграла действия в импульсе А с закороткой ЕН в момент максимума тока

Импульс тока переносит энергию немного меньшую, чем требуется в соответствии с квалификационными требованиями КТ-160G, хотя остальные параметры импульса удовлетворительны. Вариантом увеличения интеграла действия при неизменной емкости ЕН является увеличение времени от начала импульса до момента закоротки.

Соответственно на рис. 10 и 11 представлен вариант изменения момента закоротки не при максимуме разрядного тока $I_{max} = 216,8$ кА при $t = 36,2$ мкс, а в момент времени $t = 44,2$ мкс.

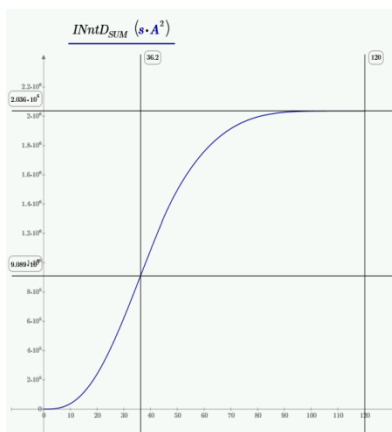


Рис. 10. График накопления интеграла действия в импульсе А с закороткой в момент $t = 44,2$ мкс

Таким образом, при удовлетворительных величине и временных характеристиках тока в нагрузке достигнута необходимая величина интеграла действия (в соответствии с квалификационными требованиями КТ-160G интеграл действия импульса А должен быть равен $(2 \cdot 10^6 \pm 20 \%) \text{ A}^2\text{s}$).

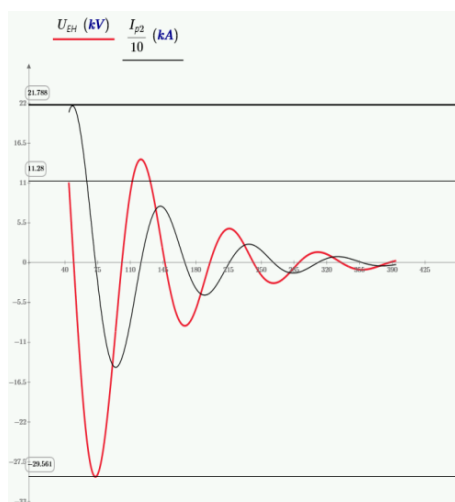


Рис. 11. График тока разрядки и напряжения ЕН после закоротки в момент $t = 44,2$ мкс

Заключение:

1. Целью исследований являлась качественная и количественная оценка значений параметров импульсов, полученных в эквивалентных разрядных контурах генератора ГИТ-А. В ходе расчетов и моделирования проанализированы различные ситуации развития динамики процесса в ходе разряда емкостного накопителя на калибровочную нагрузку. Установлено, что максимум разрядного тока $I_{max} = 216,8$ кА достигается в момент

времени $t = 36,2$ мкс. Это обеспечивало требования КТ-160G и по амплитуде, и по длительности фронта нарастания импульса, однако не достигалось заданное значение интеграла действия. Если сдвинуть момент закоротки до $t = 44,2$ мкс, то все заданные требования обеспечиваются в одной реализации.

2. В силу влияния нелинейности некоторых физических величин при протекании быстрых импульсов большого тока, а также возможных случайных неучтенных факторов, важным обстоятельством является тот факт, что аппаратные возможности изменения настроек контура находятся в достаточно широких пределах.

3. Колебательный характер процесса разряда может оказывать отрицательное влияние на ресурсные характеристики емкостного накопителя (конденсаторов), что должно явиться предметом дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базелян М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеониздат, 1978. – 223 с.
2. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: монография: в 3 т. Т. 2. Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Точка, 2010. – 407 с.
3. Бургсдорф В.Ф. Параметры токов молнии и выбор их расчетных значений // Электричество. – 1990. – № 2. – С. 9-24.
4. 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.
5. Phillipoy J. Lightning strike // Flight International. – 1972. – No. 3316. – P. 414.156.
6. 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.
7. 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.
8. Aufbauer H. Atmosphärische Entladungen auf Luftfahrzeuge // Electrofechn und Maschinenbau. – 1978. – No. 9. – P. 417-421.
9. Scully Robert. Lightning Protection for the Orion Space Vehicle NASA: Johnson Space Centre. Houston, Texas. – 77058-3696. – (Professional English). – Text: direct. – 10 p.
10. Bachelier E., Issac F., Quenum W., Enjablert V., Mohedano L. Lightning Protection of SOYUZ and VEGA launching pads // 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria. – 6 p.
11. Молния ударила в ракету «Союз» при старте с Плесецка. 27 мая 2019. – URL: <https://tass.ru/proisshestiya/6475178> (дата обращения 18.01.2021).
12. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms // SAE Aerospace. – USA, 2013. – P. 1-56.
13. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods // SAE Aerospace. – USA, 2013. – P. 1-145.
14. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». – Geneva, IEC Publ., 2010.
15. КТ-160D. Квалификационные требования РФ. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. – М. Госстандарт РФ, 2004.
16. Голосий А.С., Карловский М.Ю., Самаркин А.Л., Сахабудинов Р.В. Стенд испытаний на стойкость ракеты-носителя к воздействию молниевых разрядов // II Всероссийский форум «Взгляд молодежи на пути развития ОПК»: Сб. тезисов, Реутов, 3-4 июня, 2021 г. – С. 45-53.
17. 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.
18. 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.
19. 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.

20. Овчинникова Н.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С. Создание стендов моделирования прямого и непрямого 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.
21. Баранов М.И., Буряковский С.Г., Рудаков С.В. Инструментальное обеспечение в Украине натурных испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к воздействию импульсного тока искусственной молнии // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2018. – № 4. – С. 45-53. – ISSN 2074-272X.
22. Баранов М.И., Буряковский С.Г., Рудаков С.В. Метрологическое обеспечение в Украине испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к воздействию импульсов тока (напряжения) искусственной молнии и коммутационных импульсов напряжения // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2018. – № 5. – С. 44-53. – ISSN 2074-272X.

REFERENCES

1. Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I. *Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity* [Physical and engineering foundations of lightning protection]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 223 p.
2. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: monografiya: v 3 t. T. 2. Kn. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected issues of electrophysics: monograph: in 3 vol. Vol. 2, Book 2: Theory of electrophysical effects and problems]. Khar'kov: Tochka, 2010, 407 p.
3. Burgsdorf V.F. Parametry tokov molnii i vybor ikh raschetnykh znacheniy [Parameters of lightning currents and the choice of their design values], *Elektrichestvo* [Electricity], 1990, No. 2, pp. 9-24.
4. 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.
5. Phillpoy J. Lightning strike, *Flight International*, 1972, No. 3316, pp. 414-156.
6. 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.
7. Obrabotka i analiz sluchaev porazheniya samoletov grazhdanskoy aviatsii razryadami atmosfernogo elektrichestva. Otchet o NIR №GR80059418, Inv. № B887910 [Processing and analysis of cases of damage to civil aviation aircraft by atmospheric electricity discharges. Research report No. GR80059418, Inv. No. B887910]. Riga. GosNII ER AT GA, 1980, 88 p.
8. Aufbauer H. Atmosphärische Entladungen auf Luftfahrzeuge, *Electrotechn und Maschinenbau*, 1978, No. 9, pp. 417-421.
9. Scully Robert. Lightning Protection for the Orion Space Vehicle NASA: Johnson Space Centre. Houston, Texas. 77058-3696. (Professional English). Text: direct, 10 p.
10. Bachelier E., Issac F., Quenum W., Enjablert V., Mohedano L. Lightning Protection of SOYUZ and VEGA launching pads, *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria*, 6 p.
11. Molniya udarila v raketu «Soyuz» pri starte s Plesetsk. 27 maya 2019 [Lightning struck the Soyuz rocket during launch from Plesetsk. May 27, 2019]. Available at: <https://tass.ru/proisshestiya/6475178> (accessed 18 January 2021).
12. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms, *SAE Aerospace*. USA, 2013, pp. 1-56.
13. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods, *SAE Aerospace*. USA, 2013, pp. 1-145.
14. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
15. 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 avionics equipment. Requirements, standards and test methods]. Moscow: Gosstandart RF, 2004.
16. Golosiy A.S., Karlovskiy M.Yu., Samarkin A.L., Sakhabudinov R.V. Stend ispytaniy na stoykost' rakety-nositelya k vozdeystviyu molnievogo razryada [Test bench for the resistance of the launch vehicle to the effects of lightning discharge], *II Vserossiyskiy forum «Vzglyad molodezhi na puti razvitiya OPK»: Sb. tezisov, Reutov, 3-4 iyunya, 2021 g.* [II All-Russian Forum “Youth’s view on the development of the defense industry”: Collection of abstracts, Reutov, June 3-4, 2021], pp. 45-53.
17. Burlutskiy S.G., Golosiy A.S., Kovalev A.P., Sakhabudinov R.V. Otsenivanie kharakteristik tokovykh generatorov imitatsii molnievykh razryadov [Assessing the characteristics of current generators simulating lightning discharges], *Tr. VKA im. A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of VKA im. A.F. Mozhayskiy], 2022, Issue 682, pp. 171-182.

18. *Shishkov D.V., Yakovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S.* Raschet parametrov tokovykh impul'sov v razryadnykh konturakh vysokovol'nogo stenda molnievogo razryada [Calculation of the parameters of current pulses in the discharge circuits of a high-voltage lightning discharge stand], *Sb. materialov nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Modelirovanie parametrov atmosfery pri primeneniі sistem vooruzheniya»* [Collection of materials of the scientific and technical conference "Modeling atmospheric parameters when using weapons systems"], Korolev: FGBU «4 TSNII» Minoborony Rossii, 2022, pp. 47-51.
19. *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 equivalent circuits 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 VUNC Air Force "VVA named after. prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", November 23-25, 2022], pp. 222-226.
20. *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 modeling the direct and indirect effects 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.
21. *Baranov M.I., Buryakovskiy S.G., Rudakov S.V.* Instrumental'noe obespechenie v Ukraine naturnykh ispytaniy ob'ektov energetiki, aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhniki na stoykost' k vozdeystviyu impul'snogo toka iskusstvennoy molnii [Instrumental support in Ukraine for full-scale testing of energy facilities, aviation and rocket and space technology for resistance to the effects of pulsed current of artificial lightning], *Elektrotehnika i Elektromekhanika* [Electrical engineering and electromechanics], 2018, No. 4, pp. 45-53. ISSN 2074-272X.
22. *Baranov M.I., Buryakovskiy S.G., Rudakov S.V.* Metrologicheskoe obespechenie v Ukraine ispytaniy ob'ektov energetiki, aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhniki na stoykost' k vozdeystviyu impul'sov toka (napryazheniya) iskusstvennoy molnii i kommutatsionnykh impul'sov napryazheniya [Metrological support in Ukraine for testing energy facilities, aviation and rocket and space technology for resistance to the effects of current (voltage) pulses of artificial lightning and switching voltage pulses], *Elektrotehnika i Elektromekhanika* [Electrical engineering and electromechanics], 2018, No. 5, pp. 44-53. ISSN 2074-272X.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Костоготов.

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.

Серов Михаил Юрьевич – e-mail: miyuserov@yandex.ru; тел.: +79112529380; ведущий инженер.

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 – e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; 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.

Serov Mikhail Yurievich – e-mail: miyuserov@yandex.ru; phone: +79112529380; senior engineer.

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 – e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; associate professor.