

Оценка электромагнитной помехи в электросети ракеты при прямом попадании в нее молнии

СЕНЦОВ Ю.И.

Один из важнейших факторов, характеризующих молниестойкость ракеты, — стойкость к электромагнитным помехам, вызванным прямым попаданием молнии в ракету. Молниестойкость является актуальным фактором в связи с растущим применением микроэлектронной техники, которая при рабочем напряжении в единицы вольт крайне чувствительна к электромагнитным воздействиям, которые могут вызвать нештатную или аварийную ситуацию. Ракеты космического назначения, которые стартуют только в грозобезопасное время, подвержены воздействию молнии только на старте. Вероятность прямого попадания в них молнии мала, так как ракета защищена системой молниезащиты стартового комплекса. Тем не менее вероятность прямого попадания слабых молний составляет несколько процентов. В статье дается оценка помехи в кабельной сети ракеты, находящейся на старте, при прямом попадании в нее молнии. Полученная оценка электрической помехи в мегагерцевом диапазоне $U=15$ В может служить ориентиром при задании требования к радиоэлектронной аппаратуре ракет космического назначения.

Ключевые слова: ракета, молниестойкость ракетносителя, электрические помехи, гаргрот, кабельная сеть

В связи со строительством космодрома «Восточный» в грозоактивном районе к системе молниезащиты стартового комплекса ракет предъявляются повышенные требования. Полностью защитить ракету от воздействия молний с помощью только системы молниезащиты не удастся. Это связано с тем, что существующие системы молниезащиты стартовых комплексов защищают ракету от воздействия сильных грозовых разрядов более эффективно, чем от слабых разрядов. Поэтому при частых грозах вероятность прямого попадания в ракету слабых молний увеличивается. Защитить ракету от слабых молний можно только обеспечением молниестойкости самой ракеты. Несмотря на то, что при грозовой обстановке пуск ракет переносится, тем не менее предстартовая подготовка может продолжаться, поэтому вопросы молниестойкости ракеты остаются актуальными.

Наиболее уязвимым местом ракеты при электромагнитном воздействии молнии являются кабели, проложенные в гаргротах снаружи корпуса ракеты. Генерируемые в кабелях «наводки» проникают внутрь ракеты и поступают на входы радиоэлектронной аппаратуры по цепям питания, управления и телеметрии. Необходимость прокладки кабелей снаружи корпуса обусловлена конструкцией и температурными условиями внутри ракеты. Гаргроты представляют собой металлические (Al) кабельные каналы аэродинамической формы, частично экранирующие кабель от электромагнитного воз-

действия. Длина гаргротов достигает нескольких десятков метров.

Решение задачи проводится в соответствии с методологией, предложенной в [1].

В статье рассматривается случай прямого удара молнии в ракету, находящуюся на стартовом столе (рис. 1).

Ток молнии $I_M(t)$ растекается по поверхности ракеты и уходит в землю по линии заземления. В расчетах ток молнии моделируется выражением, принятым в [2]:

$$I_M(t) = I_{\max} k (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}),$$

где $I_{\max} = 200$ кА; $k = 1,051$; $\alpha_1 = 0,0138 \cdot 10^6$ с⁻¹; $\alpha_2 = 1,625 \cdot 10^6$ с⁻¹; t — время, с.

Временная диаграмма тока приведена на рис. 2.

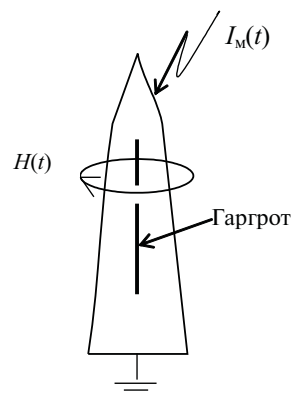


Рис. 1. Схема возбуждения электромагнитного поля при попадании молнии в ракету

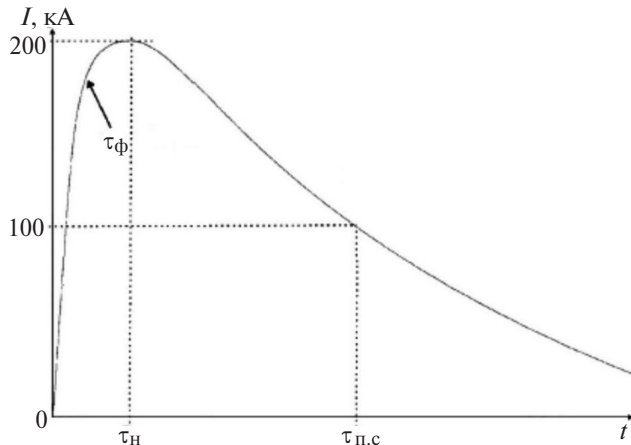


Рис. 2. Временная диаграмма импульса тока молнии: $\tau_{\text{ф}} = 2 \cdot 10^{-6}$ с – длительность фронта импульса; $\tau_{\text{н}} = 3 \cdot 10^{-6}$ с – время нарастания импульса; $\tau_{\text{п.с}} = 50 \cdot 10^{-6}$ с – время половинного спада импульса

Проходящий по поверхности вдоль ракеты ток согласно закону Ленца создает вокруг ракеты переменное магнитное поле, которое, охватывая корпус ракеты, может проникать в плохо защищенные замкнутые электрические контуры, возбуждая в них ЭДС. В нашем случае такой контур образуют экран (оплетка) кабеля, два проводника металлизации кабеля, находящихся на концах гаргрота, и металлическая поверхность корпуса ракеты (рис. 3).

Помимо магнитного поля в генерации тока в контуре участвует и электрическое поле молнии, под действием которого появляется электрический ток плазмы молнии I_E с оплетки на поверхность

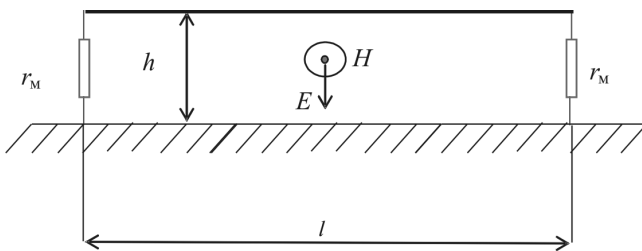


Рис. 3. Схема воздействия электромагнитного поля на электрический контур, включающий оплетку кабеля, проводники металлизации и металлическую поверхность корпуса ракеты

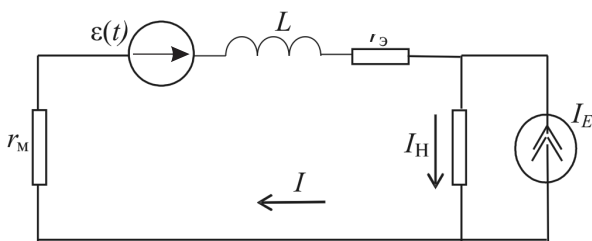


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема контура, показывающего генерацию тока в оплетке кабеля: $\varepsilon(t)$ – ЭДС, наводимая в контуре магнитным полем; L – индуктивность оплетки; $r_{\text{э}}$ – сопротивление оплетки кабеля; $r_{\text{м}}$ – сопротивление проводника металлизации; $I_{\text{н}}$ – ток, возбужденный в контуре магнитным полем; I_E – источник тока, вызванный действием электрического поля на плазму молнии

ракеты. Эквивалентная электрическая схема генерации тока в оплетке кабеля приведена на рис. 4.

Решение задачи нахождения тока в контуре будем искать в операторной форме с использованием преобразования Лапласа [3].

Операторная расчетная цепь электрической схемы приведена на рис. 5.

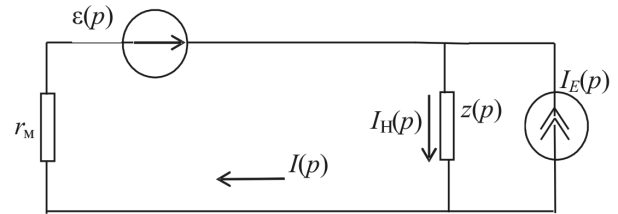


Рис. 5. Операторная схема замещения цепи

Отображение полного тока в цепи с учетом направления тока плазмы:

$$I(p) = I_{\text{н}}(p) - I_E(p).$$

Ток в цепи, вызванный действием магнитного поля,

$$I_{\text{н}}(p) = \varepsilon(p) / z(p), \tag{1}$$

где $z(p) = 2r_{\text{м}} + r_{\text{э}} + pL$.

Для определения тока $I_E(p)$ полагаем, что оплетка с поверхностью ракеты образуют конденсатор, который заряжен и находится в квазистационарном равновесии с напряженностью электрического поля молнии; найдем ток плазмы из соотношения:

$$I_E(t) = \frac{d(CU)}{dt} = ch \frac{dE(t)}{dt}, \tag{2}$$

где $c = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln 2h/r}$ – емкость оплетки радиуса r , находящейся на высоте h над металлической поверхностью.

Напряженность электрического поля с учетом [4] определим из выражения:

$$E(t) = E_{\text{м}} k (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}), \tag{3}$$

где $E_{\text{м}} = 3 \cdot 10^6$ В/м – амплитуда напряженности электрического поля в канале молнии.

Подставив (3) в (2) и выполнив преобразование Лапласа, получим следующее выражение в операторной форме для тока в цепи, вызванного электрическим полем,

$$I_E(p) = chE_{\text{м}} \frac{p(\alpha_2 - \alpha_1)}{(p + \alpha_1)(p + \alpha_2)(2r_{\text{м}} + r_{\text{э}} + pL)}. \tag{4}$$

Найдем выражение для операторной формы тока в цепи, вызванного магнитным полем.

Наводимая в контуре магнитным полем ЭДС согласно закону Фарадея равна

$$\varepsilon(t) = \mu_0 l h \frac{dH(t)}{dt}, \quad (5)$$

а напряженность магнитного поля согласно закону Био–Савара

$$H(t) = \frac{I_M(t)}{2\pi R}, \quad (6)$$

где $R=2$ м – радиус корпуса ракеты.

Подставляя (6) в (5) и проведя преобразование Лапласа, получаем операторную форму выражения для ЭДС:

$$\varepsilon(p) = \frac{k\mu_0 l h I_{\max}}{2\pi R} \frac{p(\alpha_2 - \alpha_1)}{(p + \alpha_1)(p + \alpha_2)}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (1), получим в операторной форме ток, индуцируемый магнитным полем:

$$I_H(p) = \frac{k\mu_0 l h I_{\max}}{2\pi R} \frac{p(\alpha_2 - \alpha_1)}{(p + \alpha_1)(p + \alpha_2)(2r_M + r_{\Sigma} + pL)}. \quad (8)$$

Проведя обратное преобразование Лапласа выражений (4) и (8), получаем выражения для токов в зависимости от времени:

$$I_E(t) = chE_M(\alpha_2 e^{-\alpha_2 t} - \alpha_1 e^{-\alpha_1 t});$$

$$I_H(t) = \frac{k\mu_0 l h I_{\max}}{2\pi R} \left(\frac{\alpha_2}{R - \alpha_2 l} e^{-\alpha_2 t} - \frac{\alpha_1}{R - \alpha_1 l} e^{-\alpha_1 t} - R \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)}{(R - \alpha_1 l)(R - \alpha_2 l)} e^{-Rt/L} \right).$$

На рис. 6, а и б приведены временные зависимости токов $I_E(t)$ и $I_H(t)$ при амплитуде тока молнии $I_{\max} = 200$ кА и следующих геометрических и электрофизических параметрах контура: $l=10$ м; $h=0,05$ м; $r_M = 4 \cdot 10^{-3}$ Ом; $r_{\Sigma}/l = 3,4 \cdot 10^{-2}$ Ом/м; $L/l = 10^{-6}$ Гн/м; $r = 0,004$ м.

Ток $I_H(t)$ достигает примерно 1 кА, а $I_E(t)$ равен всего 40 А. При токе $I_{\max} = 5$ кА амплитуды токов $I_H(t)$ и $I_E(t)$, как показали расчеты, равны соответственно 25 и 1 А. При уменьшении длины кабеля до 1 м оказалось, что амплитуда тока $I_H(t)$ сохраняется такой же, что и при 10 м. Объясняется это тем, что пропорционально длине уменьшились и ЭДС, и сопротивление контура. В то же время при увеличении в два раза высоты расположения кабеля ($h=0,1$ м) амплитуда тока $I_H(t)$ увеличилась тоже в два раза и составила 1,9 кА.

Ток $I_E(t)$ имеет пропорциональную зависимость как от длины оплетки, так и от высоты ее

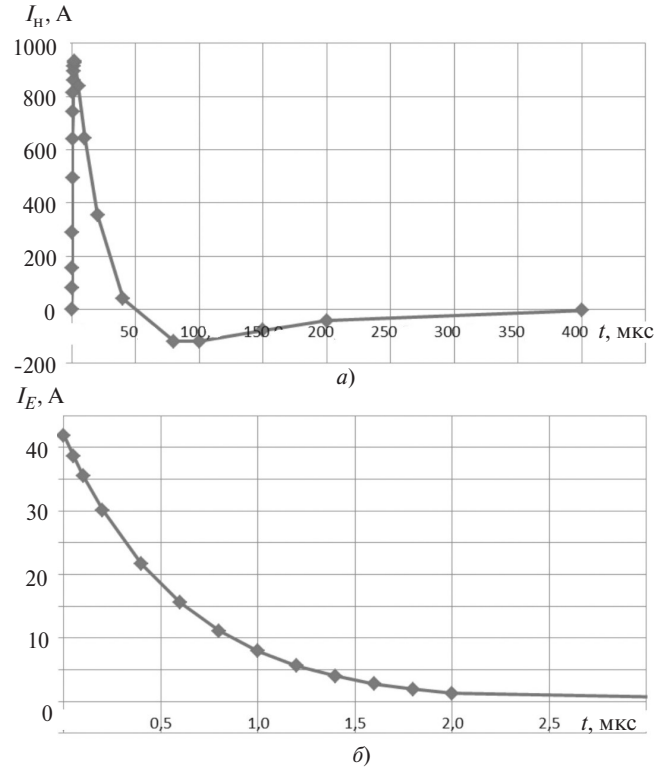


Рис. 6. Временные зависимости токов I_H (а) и I_E (б) в оплетке кабеля, индуцированных магнитным и электрическим полями молнии

расположения. Однако в связи с тем, что его значение составляет не более 4 % тока $I_H(t)$, в дальнейшем им пренебрегаем.

Следуя [1], оценим значение индуцированного синфазного напряжения в проводе кабеля, находящемся внутри оплетки. Для каждого типа оплетки и кабеля существует свой коэффициент связи между током в оплетке и напряжением в проводе кабеля. Он зависит как от конструкции оплетки, так и от конструкции кабеля, включая число проводов. Значение этого коэффициента для применяемых в авиакосмической промышленности кабелей с оплетками типа ПМС, ПМСН, ПАМУ и других находится в диапазоне от 0,02 до 0,1 В/А·м. Если для оценки взять среднее значение коэффициента связи 0,06 В/А·м, то синфазное напряжение в проводе кабеля длиной 10 м может быть 15 В при силе тока молнии $I_{\max} = 5$ кА и 600 В при $I_{\max} = 200$ кА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета. — Электронный журнал «Труды МАИ», вып. 71: www.mai.ru/science/trudy/
2. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. — М.: Радио и связь, 1987, 256 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. — М.: Гардарики, 2007, 701 с.

4. **Кравченко В.И.** Грозозащита радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 1991, 264 с.

5. **Issac F., Bachelier E., Prost D., Enjalbert V., Mohedano L.** Space Launching Site Protection against Lightning Hazards, E-mail: francois.issac@onera.fr.

[07.08.2017]

А в т о р: Сенцов Юрий Иоганесович окончил Московский физико-технический институт в 1975 г. В 1988 г. защитил диссертацию кандидата физико-математических наук. Ведущий конструктор Государственного космического научно-производственного центра им. М.В. Хруничева.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 11, pp. 36–39

DOI:10.24160/0013-5380-2017-11-36-39

Assessment of the Electromagnetic Interference Level in the Electric Network of a Rocket when Being Hit by Direct Lightning Stroke

SENTSOV Yurii I. (*Khrunichev State Research and Production Space Centre, Moscow, Russia*) – *Leading designer, Cand. of Physical and Mathematical Sciences*

The immunity to electromagnetic interference caused by direct lightning stroke hitting a rocket is one of the most important factors characterizing the rocket's lightning resistance. Lightning resistance is a topical factor due to a growing use of microelectronic equipment, which, owing to its having the operating voltage at a level of a few volts, is extremely sensitive to electromagnetic effects, which may give rise to off-design or emergency operating conditions. Space vehicle units, which are launched only under lightning-free conditions, can be hit by lightning only at the start. The probability of their being directly hit by lightning is low because rockets are protected by the launching facility lightning protection system. Nonetheless, the probability of a rocket being hit by weak lightning strokes makes a few percent. The article gives an assessment of interference induced in the cable network of a rocket installed at the launching site when being hit by direct lightning stroke. The electrical interference induced by such stroke in the megahertz band is estimated at $U = 15$ V, a level that may be used as the tentative value in specifying the requirements for the radio electronic equipment of space rockets.

Key words: *rocket, rocket vehicle lightning resistance, electric interference*

REFERENCES

1. **Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Nguyen V.Kh.** *Elektronnyi zhurnal «Trudy MAI», vyp. 71— in Russ. (Electronic magazine «Proc. of the Moscow Aviation Institute», iss. 71):* www.mai.ru/science/trudy/

2. **Kravchenko V.I., Bolotov E.A., Letunova N.I.** *Radiyelektronnye sredstva i moshchnye elektronnye pomekhi (Electronic warfare and powerful electronic interference).* Moscow, Publ. «Radio i svyaz'», 1987, 256 p.

3. **Bessonov L.A.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Elektricheskiye tsepi (Theoretical foundations of electrical*

engineering. Electric circuit). Moscow, Publ. «Gardariki», 2007, 701 p.

4. **Kravchenko V.I.** *Grozozashchita radiyelektronnykh sredstv (Lightning protection of electronic equipment).* Moscow, Publ. «Radio i svyaz'», 1991, 264 p.

5. **Issac F., Bachelier E., Prost D., Enjalbert V., Mohedano L.** *Space Launching Site Protection against Lightning Hazards,* E-mail: francois.issac@onera.fr.

[07.08.2017]