

# Безопасность систем электровзрывания в горной промышленности

**Ю.С. Петров**, зав. кафедрой, д-р техн. наук, профессор

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ

e-mail: 749951@rambler.ru

## Ключевые слова:

безопасность,  
система электровзрывания,  
статистическое моделирование,  
электромагнитная совместимость,  
взрывные работы.

*Рассмотрены вероятностные модели гальванического, индуктивного и емкостного влияния сторонних источников энергии на систему электровзрывания. Предложен и реализован алгоритм статистического моделирования (метод Монте-Карло) для анализа электромагнитной совместимости системы электровзрывания. На основании полученных результатов сформулированы конкретные рекомендации по повышению безопасности электровзрывных работ.*

## 1. Введение в проблему

Современная электромагнитная обстановка на горно-добывающем предприятии определяется наличием электротехнических объектов, формирующих электромагнитные поля, а также некоторыми технологическими процессами, приводящими к возникновению источников электромагнитных полей различной природы [1, 2, 3].

Электровзрывание, как правило, является неотъемлемым этапом технологии горного предприятия. В некоторых случаях по условиям технологии горных работ электровзрывная цепь (ЭВЦ) располагается в зоне, на которую распространяется электромагнитное влияние различных источников. При определенных обстоятельствах такое влияние может привести к возникновению в ЭВЦ сторонних (блуждающих) токов опасной величины, которые могут вызвать преждевременное срабатывание электродетонаторов (ЭД) и преждевременный взрыв взрывчатых веществ с катастрофическими последствиями. Устойчивость системы электровзрывания к воздействию внешних электромагнитных полей, ее электромагнитную совместимость (ЭМС) с влияющими электротехническими объектами можно оценить по величине сторонних электромагнитных воздействий на систему, приводящих к протеканию в ЭД блуждающих токов различной величины и к возникновению в ЭВЦ импульсов тока от сторонних электромагнитных источников.

На систему электровзрывания могут воздействовать блуждающие токи различных типов: электро-тяговые, индуктивного влияния, электрических разрядов, электромагнитного излучения и др. [3]. В реальной обстановке процесс стороннего электромагнитного воздействия на систему электровзрывания случайный, т.е. зависит от сочетания ряда случайных факторов. Для адекватной оценки степени ЭМС системы электровзрывания, условий безопасности ее функционирования следует использовать вероятностные модели стороннего электромагнитного влияния на систему, т.е. вероятностные модели ее ЭМС.

## 2. Модели влияния на электровзрывную цепь

Вероятностные модели ЭМС системы электровзрывания можно получить, используя детерминированные математические модели, количественно определяющие интенсивность стороннего электромагнитного влияния на ЭВЦ. В соответствии с принятой классификацией можно выделить три типа электромагнитного влияния по типу связей между объектами: гальваническое, индуктивное и емкостное.

**Гальваническое влияние** на ЭВЦ определяется током, втекающим в цепь через гальванические контакты. Наиболее опасный тип блуждающих токов — электро-тяговые блуждающие токи, т.е. токи в земле, порождаемые контактной электровзрывной откаткой. На рис.1 показана схема возникновения блужда-

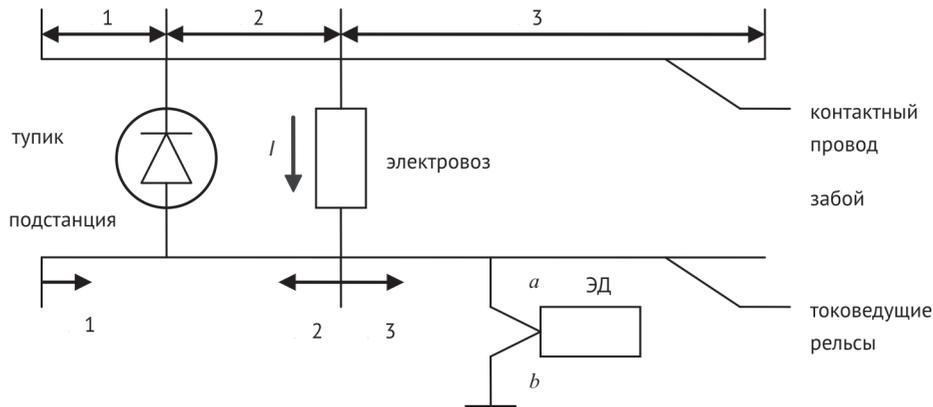


Рис. 1. Схема гальванического влияния в системе «рельс-грунт»:

$l_1, l_2, l_3$  расстояние между тупиком и тяговой электрической подстанцией, подстанцией и электровозом, электровозом и забоем соответственно, м;  $I$  – ток электровоза, А;  $x_1, x_2, x_3$  текущие координаты, м;  $\phi_0, \phi_2$  – потенциалы соответственно в точках  $a$  и  $b$ .

ющих токов в ЭВЦ в системе «рельс-грунт» при контакте проводов (в местах с нарушенной изоляцией) токоведущего рельсового пути и земли.

Формула для определения тока  $I_{ЭД}$  [4], возникающего в ЭВЦ, в этом случае имеет вид:

$$I_{ЭД} = \frac{m \cdot I}{2(R_{2E} + R_H)} (a_1 e^{k(l_1+l_2)} + e^{kl_2} - 1) (e^{kx_3} + e^{e(2l_2+x_3)}), \quad (1)$$

где:

$$a_1 = \frac{ch kl_3 - ch kl_4}{shkL}, \quad L = l_1 + l_2 + l_3, \quad l_4 = l_2 + l_3;$$

$$k = \sqrt{Z_p / Z_{пер}} \cdot m = \sqrt{Z_{пер} Z};$$

$k$  – коэффициент распространения,  $m^{-1}$ ;

$m$  – волновое сопротивление линии, Ом;

$Z_p$  – комплекс продольного сопротивления рельсового пути, Ом/м;

$Z_{пер}$  – комплекс переходного сопротивления рельс-грунт, Ом·м ( $Z_p$  и  $Z_{пер}$  для постоянного тока активные сопротивления).

Формула (1) является детерминированной математической моделью втекания электротяговых блуждающих токов в ЭВЦ. Этот процесс, как и определяющие его факторы, случайный. Вероятностную модель можно получить из формулы (1), если заменить входящие в нее случайные величины законами их распределения. В данном случае случайными можно считать все величины, входящие в формулу (1), кроме коэффициентов  $k$  и  $m$ , которые определяют параметры токоведущей рельсовой колеи конкретно для рассматриваемого случая. Анализ такой модели можно выполнить, как будет показано далее, с помощью статистического моделирования (метода Монте-Карло).

**Индуктивное влияние**, в частности линии электропередач (ЛЭП), на ЭВЦ схематически изображено на рис. 2.

Изменение тока  $I_{вл}$  во влияющей линии наводит ЭДС в контуре электровзрывной цепи, вследствие чего в замкнутой цепи возникает ток  $I_{ЭВЦ}$ , который зависит от большого количества влияющих факторов. После некоторых упрощений была получена вероятностная модель индуктивного влияния для определения тока, протекающего в электровзрывной цепи [5]:

$$I_{ЭВЦ} = 6,3 \cdot 10^{-5} \cdot I_{вл} \cdot \frac{l_{ЭВЦ}}{R_{ЭВЦ}} \cdot \ln \frac{(a+10)^2 + (10-h_N)^2}{a^2 + (10-h_N)^2} \quad (2)$$

Числовой коэффициент и числовые составляющие в правой части формулы (2) получены после подстановки в общую формулу наиболее вероятных (средних) значений, определяющих входящие в эту формулу величины. В формуле (2) параметры  $I_{вл}$ ,  $a$ ,  $l_{ЭВЦ}$  и  $R_{ЭВЦ}$  случайные величины;  $h_N$  – может иметь

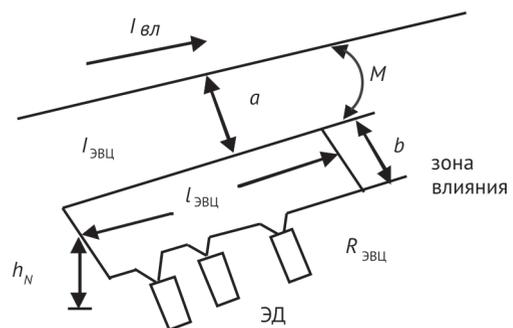


Рис. 2. Схема индуктивного влияния ЛЭП на ЭВЦ:

$I_{вл}$  – ток влияющей линии, А;  $I_{ЭВЦ}$  – ток, возникший в ЭВЦ, А;  $a$  – расстояние от влияющего провода до ближайшей стороны ЭВЦ, м;  $l_{ЭВЦ}$  и  $b$  – длина и ширина контура ЭВЦ, м;  $R_{ЭВЦ}$  – сопротивление контура ЭВЦ, Ом;  $h_N$  – высота провода ЭВЦ над землей, м;  $M$  – взаимная индуктивность, Гн.

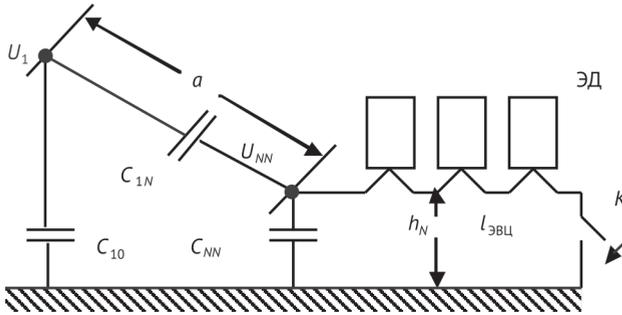


Рисунок 3.- Схема емкостного влияния ЛЭП на ЭВЦ:

$U_1$  – напряжение влияющей линии, В;  $C_{10}$  – емкость влияющего провода относительно земли, Ф;  $C_{1N}$  – взаимная емкость между влияющей линией и проводом ЭВЦ, Ф;  $K$  – ключ;  $U_{NN}$  – потенциал, наведенный на проводе ЭВЦ, В;  $C_{NN}$  – емкость провода ЭВЦ относительно земли, Ф;  $a$  и  $h_N$  – расстояние провода ЭВЦ от влияющего провода и его высота над землей соответственно, м

ряд дискретных значений, из которых далее принято  $h_N = 0,01$  м, т.е. предполагается, что провода ЭВЦ практически лежат на земле или расположены в непосредственной близости от нее.

**Емкостное влияние** может возникнуть в результате соприкосновения провода ЭВЦ с заряженным телом, например наэлектризованной лентой транспортера, наэлектризованными элементами системы пневмозаряджения, наэлектризованной спецовкой горнорабочего и т.д. На открытых горных работах емкостное влияние также могут вызывать ЛЭП, как это схематически показано на рисунке 3.

Если один провод ЭВЦ имеет контакт с землей, а другой получил контакт с наэлектризованным телом, то ЭД получают импульс тока  $K_Э$ , определяемый по формуле:

$$K_Э = \frac{U^2 C}{2(R_{пер} + R_{ЭД})}, \quad (3)$$

где:  $U$  и  $C$  – соответственно, потенциал (В) и эквивалентная емкость (Ф) наэлектризованного тела;

$R_{пер}$  и  $R_{ЭД}$  – сопротивления соответственно переходных контактов и электродетонатора, Ом.

В правой части формулы (3) все величины (кроме  $R_{ЭД}$ ) случайные.

В результате емкостного влияния ЛЭП на проводе ЭВЦ возникает потенциал  $U_N$ . При возникновении электрического контакта провода с землей (что соответствует замыканию ключа  $K$  на рис. 3) произойдет разряд на ЭВЦ эквивалентной емкости  $C_{NN}$ , в результате ЭД получит импульс тока  $K_Э$  [5], равный:

$$K_Э = 2,428 \cdot 10^{-3} \frac{l_{ЭВЦ}}{(8,517 + \ln h_N)} \cdot \left[ \ln \frac{a^2 + (10 + h_N)^2}{a^2 + (10 - h_N)^2} \right]^2. \quad (4)$$

Числовой коэффициент и числовые составляющие в правой части формулы (4), как и при записи формулы (2), были получены в результате замены некоторых переменных в более полной (общей) формуле наиболее вероятными их значениями, что позволило существенно упростить исходную формулу, практически не снижая ее обобщающий характер. В формуле (4) набор независимых случайных переменных  $l_{ЭВЦ}$ ,  $a$ ,  $h_N$  определяет конкретную ситуацию электрического воздействия ЛЭП на ЭВЦ.

Для дальнейшего анализа полученных вероятностных моделей было использовано статистическое моделирование (метод Монте-Карло) [6]. На рисунке 4 изображен обобщенный алгоритм применения этого метода для вероятностного анализа стороннего электромагнитного влияния на ЭВЦ и оценки ЭМС системы электровзрывания.

Реализация приведенного алгоритма, статистическая обработка полученных расчетных данных были выполнены с использованием математического программного пакета MathCad. Математическую основу статистического моделирования составили вероятностные модели гальванического, индуктивного и емкостного влияния, а образующей математической операцией стало вычисление значения выходной величины (тока, импульса тока) для конкретного

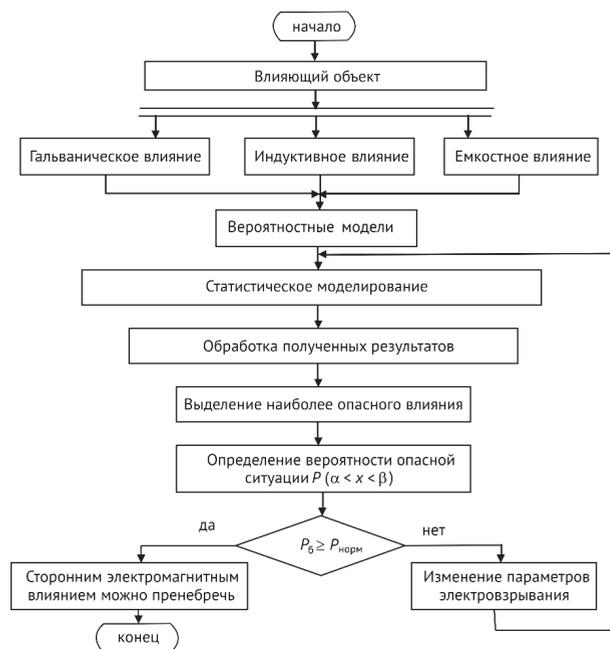


Рис. 4. Алгоритм вероятностного анализа стороннего электромагнитного влияния на ЭВЦ и оценки ЭМС системы электровзрывания:

$P_0$ ,  $P_{норм}$  – безопасная и нормированная вероятности соответственно;

$P(\alpha < x < \beta)$  – вероятность попадания случайной величины  $x$  (тока, импульса тока) в интервал с границами  $\alpha$ ,  $\beta$ .

набора случайных значений входящих в соответствующую формулу параметров, т.е. случайная  $i$ -я реализация воздействия на ЭВЦ влияющего объекта.

Исходные данные для расчетов были определены в результате анализа типовых ситуаций, встречающихся на практике [3]. На основании анализа большого количества экспериментальных данных и с учетом характера изменения соответствующих величин были приняты соответствующие законы распределения случайных переменных, входящих в формулы.

На ЭВМ было реализовано по  $10^4$  вариантов для каждого типа влияния. В результате обработки полученных данных были получены гистограммы и законы распределения соответствующих величин. Можно считать, что с достаточной для практики точностью все выходные величины при заданных исходных законах распределения случайных переменных подчиняются экспоненциальному закону:

$$\Theta(x, \lambda) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0 \\ \lambda e^{-\lambda x} = \frac{1}{x_0} e^{-x/x_0} & \text{при } x \geq 0, \end{cases} \quad (5)$$

где:  $\lambda$  — параметр распределения;

$$x_0 = \frac{1}{\lambda} — \text{математическое ожидание случайной ве-}$$

личины;

$x$  — сторонний (блуждающий) ток в ЭВЦ ( $I$ , А) при гальваническом или индуктивном влиянии или сторонний импульс тока ( $K$ ,  $A^2 \cdot c$ ) в ЭВЦ при емкостном влиянии.

В результате статистического моделирования были получены следующие параметры законов распределения: гальванического влияния в условиях подземных горных работ для тяговых блуждающих токов  $\lambda_T \approx 7,14 A^{-1}$ ; в условиях открытых горных работ (для токов утечки из электрических сетей)  $\lambda_Y \approx 9,09 A^{-1}$ ; для индуктивного влияния (открытых горных разработок)  $\lambda_U \approx 4,59 A^{-1}$ ; для емкостного влияния (открытых горных разработок)  $\lambda_M \approx 5,05 \cdot 10^{-3} (A^2 c)^{-1}$ .

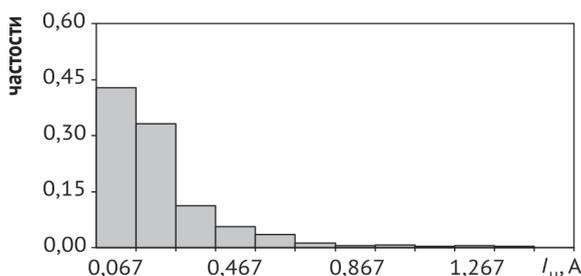


Рис. 6. Гистограмма распределения токов в электровзрывной цепи при индуктивном влиянии

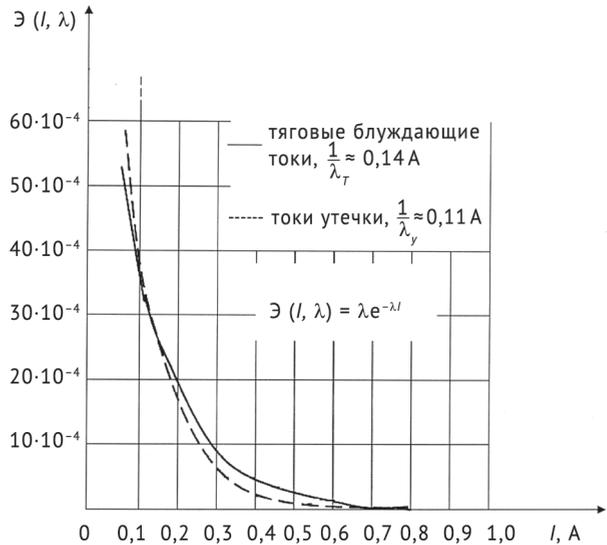


Рис. 5. Кривые дифференциальных законов распределения тяговых блуждающих токов и токов утечки при гальваническом влиянии

На рисунке 5 приведены кривые дифференциальных законов распределения тяговых блуждающих токов и токов утечки при гальваническом влиянии. По горизонтальной оси графика отложены значения блуждающих токов (А), по вертикальной — значения функции  $\Theta(I, \lambda)$ .

На рисунке 6 приведена гистограмма распределения токов в электровзрывной цепи при индуктивном влиянии. По горизонтальной оси откладывается ток индуктивного влияния  $I_U$ , А, по вертикальной — частоты.

На рисунке 7 приведена гистограмма распределения импульсов тока в электровзрывной цепи при емкостном влиянии. По горизонтальной оси откладывается импульс тока  $K_C \times 10^{-4}$ ,  $A^2 \cdot c$ , по вертикальной — частоты.

На рисунках 6 и 7 по горизонтальным осям даны середины интервалов изменения соответственно тока  $I_U$  и импульса тока  $K_C$ . Рисунки 5, 6, 7 иллюстрируют величину и вероятность появления случайных факторов, оказывающих электромагнитное влияние на электровзрывную цепь. Полученные законы рас-

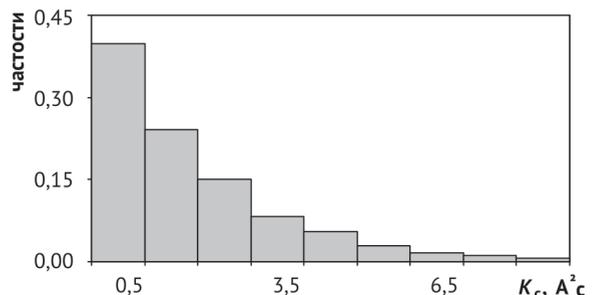


Рис. 7. Гистограмма распределения импульсов тока в электровзрывной цепи при емкостном влиянии

пределения были использованы для оценки электромагнитной совместимости электровзрывных цепей с влияющими объектами.

Вероятность попадания в заданный интервал ( $\alpha$ ;  $\beta$ ) случайной величины, распределенной по экспоненциальному закону, в общем случае равна:

$$P(\alpha < x < \beta) = e^{-\lambda\alpha} - e^{-\lambda\beta}. \quad (6)$$

Для токов гальванического и индуктивного влияния вероятность безопасного воздействия на ЭД (безопасная вероятность  $P_0$ ) определяется интервалом от нуля до безопасного тока ЭД  $I_0$ , А, т.е.

$$P_0(0 < I < I_0) = 1 - e^{-\lambda I_0}. \quad (7)$$

Для импульсов токов емкостного влияния безопасная вероятность определяется интервалом от нуля до минимального импульса воспламенения ЭД  $k_{\min}$ , А<sup>2</sup>с:

$$P_0(0 < k < k_{\min}) = 1 - e^{-\lambda k_{\min}}, \quad (8)$$

Значения параметров  $I_0$  и  $k_{\min}$  взяты из паспортных данных соответствующих изделий.

Используя (6), (7) и (8), можно оценить вероятность безопасной (и, следовательно, безотказной) работы системы электровзрывания, сравнить ее с нормируемым значением  $P_{\text{норм}}$ . Последнее определяется на основании требований к вероятности безотказной работы системы электровзрывания, которая согласно [7] должна быть не менее 0,9998. Таким образом, вероятность возникновения опасной ситуации должна быть не более 0,0002.

Согласно алгоритму рисунка 4 при удовлетворительных параметрах электромагнитной совместимости системы, т.е. при выполнении условия  $P_0 \geq P_{\text{норм}}$  вероятностью возникновения опасных ситуаций можно пренебречь.

При неудовлетворительных параметрах, т.е. если условие  $P_0 \geq P_{\text{норм}}$  не выполняется и, следовательно, вероятность возникновения опасных ситуаций  $P_{\text{оц}} = 1 - P_0$  выше нормированной (более 0,0002),

необходимо принять дополнительные меры для обеспечения безопасности электровзрывных работ и провести дальнейшие оценивающие расчеты.

Необходимо отметить, что тип законов распределения выходных величин при статистическом моделировании в значительной мере зависит от изначально принятых законов распределения влияющих переменных. Как показали вычисления, закон распределения тока при гальваническом влиянии может в некоторых случаях быть нормальным или даже описываться зависимостью из двух нормальных распределений [8].

### 3. Заключение

Полученные вероятностные характеристики и предложенный алгоритм можно использовать для анализа ЭМС системы электровзрывания, для обоснования безопасных параметров воздействий на электровзрывную цепь и выработки рекомендаций по предотвращению опасных ситуаций, обусловленных этими воздействиями.

Как показали результаты проведенного анализа, для предотвращения втекания токов опасной величины (более безопасного тока ЭД) в электровзрывную цепь непосредственно из земли (гальваническое влияние) необходимо поддерживать изоляцию проводов ЭВЦ относительно земли в пределах 3÷5 кОм, но не менее 1 кОм. Для уменьшения токов индуктивного влияния основным требованием является ограничение площади, охватываемой электровзрывной цепью. В зависимости от напряжения влияющей ЛЭП площадь контура на один ЭД должна быть не более 3÷20 м<sup>2</sup>. Существенно уменьшить реальную площадь, охватываемую электровзрывной цепью, можно, если применять свитые провода или специальный взрывной кабель. Для уменьшения емкостного влияния желательнее располагать провода электровзрывной цепи непосредственно на земле, не подвешивая их на естественные или искусственные приспособления. Если нет возможности следовать этим рекомендациям, необходимо применять ЭД специальных типов — устойчивые к воздействию блуждающих токов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др.; под ред. А.Ф. Дьякова. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 768 с.
2. Пагиев К.Х., Петров Ю.С. Токи в земле как фактор электромагнитного загрязнения среды на горных предприятиях. Ж. Вестник международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ), №4, 2004 г., С. 51–55.
3. Защита зарядов взрывчатых веществ от преждевременных взрывов блуждающими токами /М.М. Граевский, В.Ф. Ермошин, П.С. Залесский и др.; под ред. М.М. Граевского — М.: Недра, 1987. — 380 с.
4. Петров Ю.С. Основы теории электровзрывания. Изд. «Терек», СКГТУ, Владикавказ, 1998 г. — 167 с.
5. Петров Ю.С., Масков Ю.П., Петрова В.Ю. Анализ электромагнитного влияния высоковольтных линий электропередач на электровзрывные цепи в условиях

- горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий, 2011, №3(9), С.71–77.
6. *Ермаков С.М.* Метод Монте-Карло в вычислительной математике: ввод. курс. /С.М. Ермаков. — М.; СПб.: Бинном. Лаб. Знаний: Нев. диалект, 2009. — 192 с.
7. Госгортехнадзор СССР. Информационный бюллетень, №11(930)-89. Перспективные технические требования к системам электровзрывания. Москва-1989, 20 с.
8. *Петров Ю.С., Масков С.П.* Статистическое моделирование процесса воздействия тяговых блуждающих токов утечки из электрических сетей на электро-взрывные сети. // Академия наук высшей школы Российской Федерации, Северо-Осетинское отделение. Владикавказ 2011, №9, 2011, С.49–56.

## Safety of Electric Blasting Systems in Mining Industry

**Yu.S. Petrov**, Doctor of Engineering, Professor, Head of chair, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz

*Probabilistic models of galvanic, inductive and capacitor influences of extraneous power sources on electric blasting system are considered. Statistical modeling algorithm (Monte-Carlo algorithm) for analysis of electric blasting system electromagnetic compatibility is offered and realized. Specific recommendations for increasing of electric blasting works safety are formulated on the ground of obtained results.*

**Keywords:** safety; electric blasting system; statistical modeling; electromagnetic compatibility; blasting workings.

### Правительством Российской Федерации утверждено Положение

#### о лицензировании эксплуатации химически опасных производственных объектов

Постановлением Правительства Российской Федерации от 27.09.2012г. утверждено новое Положение о лицензировании эксплуатации химически опасных производственных объектов и признано утратившим силу действовавшее ранее постановление Правительства Российской Федерации от 14.07.2006г. № 429 «О лицензировании эксплуатации химически опасных объектов». Постановление подписано Председателем Правительства Российской Федерации Дмитрием Медведевым.

Новое Положение о лицензировании эксплуатации химически опасных производственных объектов (далее — Положение) разработано в целях реализации положений Федерального закона от 04.05.2011г. № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности» (далее — Закон о лицензировании) и совершенствования правового регулирования лицензирования эксплуатации химически опасных производственных объектов.

Положение определяет порядок лицензирования эксплуатации химически опасных производственных объектов, осуществляемый юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями (далее — лицензируемый вид деятельности).

В рамках постановления реализованы положительные нововведения закона о лицензировании, к которым, в частности, можно отнести разграничение требований к соискателям лицензии при подаче заявления и лицензиатам при осуществлении лицензируемого вида деятельности, более детальная регламентация порядка переоформления лицензий, дополнен перечень документов, установленный законом о лицензировании, необходимый для оформления лицензии, определен порядок размещения лицензирующим органом в информационно-телекоммуникационных сетях общедоступных сведений при лицензировании эксплуатации химически опасных производственных объектов.

Ознакомиться с Постановлением Правительства Российской Федерации и приложением к нему можно по ссылке [правительство.рф/gov/results/20951/](http://pravительство.рф/gov/results/20951/)

### Опубликованы «Правила обеспечения промышленной безопасности нефтеперерабатывающих, нефтегазохимических и газоперерабатывающих комплексов»

В приложении к Правилам представлена развернутая методика анализа и оценки риска, дан обзор и краткое описание программных комплексов для анализа рисков со ссылками на сайты разработчиков (общий объем материала — 120 с.). Методика включает следующие разделы: обзор процедур анализа риска; порядок подготовки данных для анализа риска; порядок моделирования сценариев аварий; порядок представления результатов анализа риска.

В приложении рассмотрены: семейство программ PHAST(Process Hazard Analysis Software Tool); программные продукты FRED (Fire, Release, Explosion, Dispersion), RiskSpectrum, PIPA (Pre-Incident Planning Assessment tool); пакеты программного обеспечения SHEPHERD компании Shell, RISKCURVES, Riskplot программный комплекс EFFECTS; CIRBUS.

С материалом можно познакомиться на сайте Ростехнадзора (<http://www.gosnadzor.ru/>) и сайте журнала.

*Материал подготовил Девисилов В.А.*