

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ УРОВНЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОМЕХАМ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА

*Владимир Князев*

НТУ «ХПИ», НИПКИ «Молния», ул. Шевченко, 47, г. Харьков, 61013, Украина.

*e-mail: knyaz2@i.ua*

*Резюме:* В материалах представлено некоторые практические аспекты анализа функциональной безопасности оборудования в условиях действия внешних электромагнитных помех. Рассмотрена методика гармонизации уровня устойчивости системы автоматизированного контроля и управления стратегическим объектом с возможными уровнями электромагнитных помех, сопровождающих молниевый разряд. Подробно изложено статистический метод расчета плотности вероятности ударов молнии в элементы объекта и метод экспериментального определения каналов растекания тока молнии. Методы прошли экспериментальную апробацию на объектах энергетики Украины.

*Ключевые слова:* функциональная безопасность, вероятность удара молнии, сила тока молнии, уровень устойчивости.

## 1. Введение

Безопасность эксплуатации стратегических объектов зачастую становится более важным критерием чем экономическая целесообразность. После разрушительных последствий аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1 в некоторых странах (например, ФРГ) приняли решение о сворачивании и запрещении развития атомной энергетики на своей территории. Однако, в мире существует и успешно эксплуатируется большое число атомных станций, что в значительной степени обеспечивает энергетические потребности человечества. В связи с этим, особое внимание стало уделяться требованиям функциональной безопасности. Общие положения и подходы к обеспечению этих требований содержатся в сериях стандартов МЭК [1, 2]. С имеющейся соответствующей нормативной базой можно ознакомиться на сайте МЭК [3].

Функциональная безопасность является частью общей безопасности системы или оборудования и, как правило, фокусируется на электронике и соответствующем программном обеспечении. В системном подходе функциональная безопасность идентифицируется как потенциально опасные условия, ситуации или события, которые могут привести к аварии, в результате чего может быть нанесен вред кому-то или уничтожено что-нибудь. Этот подход позволяет осуществить корректирующие или превентивные меры для предотвращения аварии или минимизации ее последствий.

Важнейшим аспектом функциональной безопасности объектов является устойчивость

систем автоматизированного контроля и управления процессами (САКУП) к действию внешних электромагнитных помех. Общие требования по параметрам устойчивости к таким системам содержатся в стандарте [4]. Особенности требований к САКУП, эксплуатируемых на атомных станциях, изложено в стандарте [5].

Очевидно, что сертификация САКУП на соответствие требованиям стандартов есть необходимое, но не достаточное условие обеспечения в полной мере функциональной безопасности, поскольку не учтена реальная электромагнитная обстановка в месте эксплуатации на объекте. Кроме того, возникают риски, связанные с недостаточностью информации о том, каковы параметры электромагнитных явлений в месте эксплуатации, которые могут возникнуть в результате естественного (например, удар молнии) или преднамеренного (террористический акт) воздействия и как отреагирует САКУП на такие воздействия. Следует отметить, что в настоящее время, для большинства объектов такие исследования не проводились. Возможные террористические угрозы автору представляются маловероятным фактором, однако, их нельзя исключить полностью. Достаточно вспомнить большое число желающих ослепить пилотов самолетов с помощью лазерной указки. Некоторые обобщения параметров возможных преднамеренных помех приведены в [6] и в рамках данной статьи не рассматриваются.

Весьма вероятным природным явлением есть молниевый разряд, который создает электромаг-

нитные помехи, распространяющиеся в виде импульсов напряжения и тока по цепям электрического питания, проводным линиям управления, цепям связи, контурам заземления и в виде импульсного электромагнитного поля. Естественно, что указанные в стандартах, например, в стандарте [5], параметры помех определены в результате усреднения по различным объектам. При этом не принимались во внимание особенности каждого объекта, в том числе в части построения системы молниезащиты.

В рамках данной статьи излагается методика, предлагаемая автором, для реализации вероятностного прогноза параметров электромагнитных помех, сопровождающих молниевый разряд, в месте расположения САКУП. Подробно изложено основные новые положения: статистический метод расчета плотности вероятности ударов молнии в элементы объекта и метод экспериментального определения каналов растекания тока молнии.

## 2. Алгоритм методики

Методика определения возможных последствий удара молнии в элементы объекта включает следующие основные этапы:

- определение расчетным методом наиболее вероятных мест удара молнии, с учетом вероятных параметров тока молнии;
- экспериментальное исследование целостности контуров заземления на объекте и определение величины сопротивления растекания тока молнии. Разработка рекомендаций по его совершенствованию (при необходимости);
- экспериментальное определение каналов растекания тока молнии при ударе в выбранные элементы объекта;
- экспериментально-расчетное определение коэффициентов трансформации энергии молнии в импульсы напряжения и тока, которые распространяются по гальваническим цепям и поступают на порты оборудования;
- определение параметров напряженности электрического и магнитного полей, сопровождающих молнию, в местах расположения элементов САКУП с учетом экранирующих свойств зданий и сооружений;
- сравнительный анализ прогнозируемых уровней электромагнитных помех с уровнями устойчивости, заданными стандартами для конкретного изделия;
- экспериментальное определение устойчи-

вости оборудования САКУП к импульсам напряжения, тока и электромагнитных полей с параметрами, определенными на предыдущих этапах;

- определение необходимости установки дополнительных устройств защиты по портам оборудования, включая порт корпус, и формирование требований к таким устройствам;
- обеспечение контроля стабильности защитных свойств корпусов-экранов и оболочек кабелей элементов САКУП в процессе эксплуатации.
- оценка рисков возникновения нештатных ситуаций на объекте вследствие удара молнии.

Реализация методики в полном объеме требует времени и значительных средств. Поэтому, возможны варианты ее поэтапной реализации, на основе экспертной оценки целесообразности проведения того или иного этапа. Рамки статьи не позволяют изложить детали реализации всех упомянутых выше этапов, поэтому, далее рассмотрены только те, которые по мнению автора являются новыми.

## 3. Статистический метод определения вероятности поражения молнией элементов объекта

Современные методики оценки эффективности защиты объектов изложены в стандарте [7], а также в ряде публикаций, например, [8-10]. Эти методики построены на использовании метода «угла защиты» и «катящейся сферы» (EGM). Установлены дискретные значения для четырех уровней надежности молниезащиты: 0,99, 0,97, 0,91 и 0,84. Радиус расчетной сферы зависит от требуемого уровня надежности перехвата молний с малыми значениями потенциалов лидера (малыми токами молнии).

«Малые» молнии являются наиболее трудными для перехвата, однако не менее опасными для оборудования. Система молниезащиты, спроектированная из расчета радиуса катящейся сферы 20 м, теоретически способна обеспечить перехват 99% молний из своей области стягивания. На практике может быть иначе, поскольку не учитываются следующие важные обстоятельства.

А) «Малая» молния может миновать систему молниезащиты, что особенно характерно для молний с потенциалом менее 10 МВ (током менее 3 кА). Таких молний по международной статистике [7, 11] вроде бы и не много (1-2 %), однако, эту

цифру следует использовать весьма осторожно, поскольку, молнии с такой силой тока стали регистрировать только в последнее время. Поэтому, еще нет достоверного статистического материала.

В) Есть определенные противоречия при оценке радиуса расчетной сферы, связанные с интерпретацией статистических результатов разными авторами. Используется аналитическая зависимость вида (1):

$$R = k \cdot I \cdot c \quad (1)$$

где:  $R$ , м – пробивное расстояние (радиус сферы) в методе EGM;

$I$ , кА – сила тока молнии;

$k$  и  $c$  – константы, равные:

10,0; 0,65 [7, 10] и 6,0; 0,813 [9].

Результаты расчетов для этих вариантов представлены в таблице 1. Очевидно существенное различие в величине радиуса сферы для токов силы менее 5 кА. Следовательно, фактическая вероятность перехвата молнии системой, спроектированной по стандарту [7], также может отличаться от расчетной.

Таблица 1 – Зависимость  $R$  от силы тока молнии

Параметр	Уровень молниезащиты			
	I	II	III	IV
$I$ , кА	3	5	10	16
$R$ , м [7, 10]	20	30	45	60
$R$ , м [9]	14,6	22	39	57

С) Зонные методы не обеспечивают возможность детальной оценки вероятности поражения молнией объектов большой площади, поскольку, не учитывают реальных конструкций комплексов и их окружения.

Автором сформулирован новый метод оценки вероятности попадания молнии в здания о сооружения, который позволяет получить картину распределения плотности вероятности прорыва молнии по территории объекта. На данном этапе реализован вариант, в основу которого положен принцип минимума величины пробивного промежутка. Использование этого принципа, несмотря на некоторые критические замечания, положен в основу зонного метода EGM [7], что позволяет осуществить сертификацию программного продукта.

Суть данной модели заключается в том, что процесс ориентировки лидера молнии полагается начавшимся, когда его стримерная зона касается

земли, заземленного объекта или молниеотвода. В данной модели полагается, что удар молнии произойдет в зону, которую первой достигнет один из конкурирующих искровых каналов, развивающихся в стримерной зоне от лидерного канала молнии во всех возможных направлениях к заземленным участкам, подсоединение к которым обеспечивает образование гальванически замкнутой цепи.

Реализованная в программе вычислительная модель такова. Имеется исследуемый объект, представляющий собой территорию, на которой размещены элементы объекта (строения и сооружения). По заданному значению тока молнии определяется радиус пробоя, соответствующий радиусу "катящейся сферы". С некоторым шагом на поверхности земли задается сетка. Для каждого узла сетки определяется максимальная высота, при которой данная катящаяся сфера касается земли или точки на любом элементе объекта, проекция на землю для которой соответствует этому узлу сетки. Эта высота пропорциональна количеству поражений молнией той точки земли или строения, для которой зафиксировано касание. При моделировании можно задать конкретное значение тока молнии или диапазон его изменения (см. Рис. 1). В последнем варианте результат расчетов учитывает вероятность появления молнии с определенной силой тока.

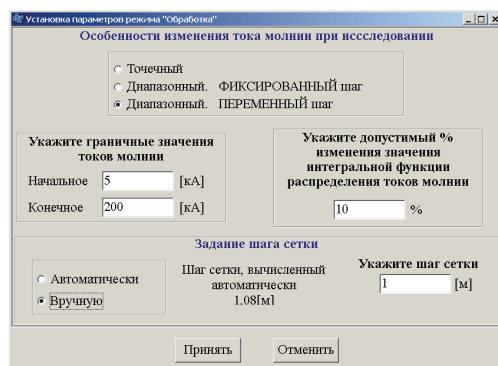


Рис. 1 Окно установки значений параметров, характеризующих режим выполнения исследования для случая ПЕРЕМЕННЫЙ шаг при ручном режиме.

Вероятность возникновения силы возвратного тока молнии, превышающей заданное значение, графически представлена в стандарте [7]. Для целей данной работы используется аналитическая аппроксимация зависимости из работы [11], представленная в виде формулы (2).

$$P(I) = [1 + (I/a)^b]^{-1} \quad (2)$$

где:  $P(I)$  – вероятность того, что сила тока нисходящей отрицательной молнии превышает значение  $I$ ;

$I$ , кА – значение тока нисходящей отрицательной молнии;

$$a = 31; b = 2,6.$$

Преимущества такого подхода заключаются в следующем:

- возможно получение данных о вероятности поражения того или иного элемента объекта с любой степенью детализации;
- создание системы молниезащиты возможно с учетом оптимизации надежность-стоимость за счет детального знания наиболее вероятных зон прорыва молнии на критически важные элементы объекта;
- при обеспечении заданного уровня надежности системы молниезащиты можно учесть статистические особенности параметров молнии в месте расположения объекта (при условии, что такие данные есть).

#### 4. Реализация статистического метода

Алгоритм решения задачи основан на предположении равной вероятности появления нисходящей молнии из любой точки в горизонтальной плоскости над объектом. Высота расположения плоскости определяется как сумма максимальной высоты элементов объекта и пробивного расстояния, определенного по формуле (1). Осуществляется перебор всех возможных точек пространства, формируемого с учетом указанных выше условий в привязке к узлам сетки.

В качестве тестового объекта выбран вариант сочетания двух зданий в виде параллелепипедов, отличающихся габаритными размерами, одиночного молниеотвода и тросового молниеотвода, расположенных на участке размерами 150x200 м<sup>2</sup>. Результаты вычислений значений условных вероятностей попадания молнии в элементы сооружений на объекте могут быть представлены в виде рисунков в форматах 2D и 3D. Рисунок 2D содержит зоны заданных диапазонов вероятностей идентифицированных цветовой гаммой. Поэтому, такой вариант результата здесь не приводится. На рисунке 2 представлены результаты расчетов полных вероятностей в табличном варианте, а на рисунке 3 – распределение плотности вероятности в 3D отображении.

Элемент объекта	Полные вероятности поражения	Относительно молниезащиты
№1 Мачта	5.5762E-001	100.000%
№2 Трос	3.4875E-001	62.542%
№3 Здание	2.0680E-001	37.087%
№4 Здание	1.2644E-001	22.678%
Земля	4.2833E-002	7.681%

Рис. 2 - Значения условных вероятностей попадания молнии для каждого элемента сооружений на объекте

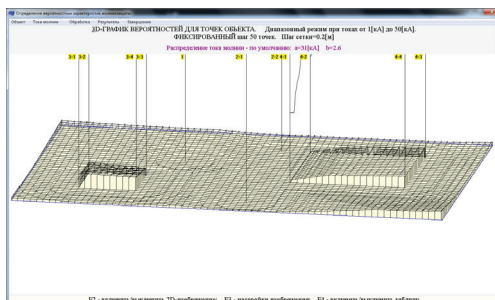


Рис. 3 - 3D-отображение результатов вычислений плотности вероятности поражения каждой точки на объекте (для целей визуализации масштаб по вертикали изменен)

Очевидно, что предлагаемая реализация метода позволяет осуществить расчет вероятности поражения молнией защищенных и незащищенных объектов с учетом реальной структуры объекта (структуры зданий и сооружений объекта, структуры системы молниезащиты). Кроме того, есть возможность учесть особенности окружающих условий (высоковольтных линий передачи электроэнергии, электрифицированных железных дорог, вышек сотовой связи и т.п.).

#### 5. Метод экспериментального определения каналов растекания тока

Экспериментальный метод определения каналов растекания тока молнии по гальваническим связям объекта основан на использовании принципа магнитной локации. Суть его заключается в следующем. На элемент объекта, который является местом вероятного удара молнии подключается потенциальный электрод генератора гармонического напряжения. Нулевой электрод присоединяется к удаленному заземлителю. Частота генератора выбирается в диапазоне до 1 кГц. При протекании тока, фиксируется величина

напряжения с индукционного преобразователя (ИП). ИП является резонансно настроенным на частоту генератора, поэтому, сторонние магнитные поля, в том числе и частоты сети, не оказывают заметного влияния на результаты измерения. Это обстоятельство позволит проводить исследования на объектах энергетики в штатном режиме и на весьма малых уровнях сигнала. ИП последовательно размещается над всеми потенциальными каналами протекания тока. По результатам измерений строится схема растекания тока с указанием доли интегрального тока, протекающего по элементу.

Следующим логичным шагом является определение уровня напряжений, которые могут поступить на входные порты САКУП, имеющие гальваническую связь с элементами растекания тока молнии. Для этого, в возможный канал растекания тока вводится сигнал с импульсного генератора. Временные параметры импульса тока соответствуют среднестатистическим параметрам тока молнии. Уровень испытательного сигнала выбирается таким, чтобы не нанести вред портам САКУП. При этом, с помощью осциллографа регистрируется сигнал, наведенный на элементах проводной связи по отношению к «земле», приходящий на порт САКУП. Далее, осуществляется экстраполяция результатов измерений на значения наведенных напряжений вследствие действия натурной молнии.

Эти методы в совокупности обеспечивают возможность получения достаточно полной информации для осуществления достоверного прогноза относительно параметров напряжений и токов, которые будут вызваны ударом молнии в тот или иной конструктивный элемент объекта. Примеры результатов исследований на конкретных объектах энергетики Украины представлены в работе [12].

## 6. Выводы

Совокупность результатов, полученных путем реализации предложенной методики, или ее части, описанной выше, позволяет осуществить сопоставление уровня устойчивости САКУП при сертификации с возможными уровнями электромагнитных помех, сопровождающих молниевый разряд, в месте размещения САКУП на объекте.

## 7. Литература

[1] IEC 61508:2010, Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems IEC, CH.

[2] IEC 61511:2003, Functional Safety: Safety Instrumented Systems for the Process Industry IEC, CH.

[3] <http://www.iec.ch/functionalsafety/>.

[4] IEC 61000-1-2:2008 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-2: General – Methodology for the achievement of functional safety of electrical and electronic systems including equipment with regard to electromagnetic phenomena.

[5] IEC 62003:2009 Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Requirements for electromagnetic compatibility testing.

[6] **Kniaziev V.V.** Standard parameters of the high-power ultrawideband electromagnetic phenomena / V.V. Kniaziev, V.I. Kravchenko //

Proc. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 15-19 September, 2014, Kharkiv, Ukraine, P.1-6.

[7] IEC 62305-1:2010 Protection against lightning – Part 1: General principles.

[8] Lightning Protection / Edited by Vernon Cooray // Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2010.-1070 p.

[9] Lightning Electromagnetics / Edited by Vernon Cooray // Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2012.-917 p.

[10] **Cooray V.** On the possible variation of the lightning striking distance as assumed in the IEC lightning protection standard as a function of structure height / V. Cooray, U. Kumar, F. Rachidi, C. Nucci // Electric power systems research.- 2014.- v.113.- P.79-87.

[11] CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications.

[12] **Глебов О.Ю.** Определение степени влияния электромагнитных эффектов молнии на оборудование объектов энергетики / О.Ю. Глебов, В.В. Князев, Г.М. Колиушко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – X. : НТУ «ХПИ», 2013. – № 60 (1033). – С. 43–51.

## Благодарность

Автор выражает благодарность Владимиру Дронову за совместный труд в реализации статистического метода определения вероятности поражения молнией элементов объекта.

## Данные об авторе:

**Владимир Владимирович Князев.** Закончил Харьковский государственный университет по специальности “Физика” (1975). Канд. техн.

наук по специальности “Техника высоких напряжений” (ВЭИ, 1987), звание - старший научный сотрудник (1993); руководитель научно-исследовательского отдела Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института “Молния” (НИПКИ “Молния”) НТУ “ХПИ”. Лауреат Госу-

дарственной премии Украины в области науки и техники за 2006 год. Основные направления деятельности: электромагнитная совместимость (ЭМС) технических средств, стандартизация и метрология в области ЭМС, теория и практика молниезащиты объектов.

## DETERMINATION OF THE NECESSARY LEVELS OF SUSTAINABILITY OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEMS TO ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE FROM LIGHTNING DISCHARGE

*Volodymyr Kniaziev*

NTU “KPI”, RDI “Molniya”, Shevchenko str. 47, Kharkiv, 61013, UA,

*e-mail: knyaz2@i.ua*

*Abstract:* This document presents some of the practical aspects of the analysis of functional safety equipment in conditions of electromagnetic interference. The methodology of harmonization of the level of stability of the automated control systems of a strategic object to possible electromagnetic interference accompanying the lightning discharge is presented. A detailed explanation of the statistical method for calculating the probability density of lightning strikes in parts of the subject and the method of experimental determination of the lightning channel current spreading. The methods have been tested on a power plant in Ukraine.

*Key-Words:* functional safety, the probability of a lightning strike, the lightning current, the level of sustainability.

### References

- [1] IEC 61508:2010, Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems IEC, CH.
- [2] IEC 61511:2003, Functional Safety: Safety Instrumented Systems for the Process Industry IEC, CH.
- [3] <http://www.iec.ch/functionalsafety/>.
- [4] IEC 61000-1-2:2008 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-2: General – Methodology for the achievement of functional safety of electrical and electronic systems including equipment with regard to electromagnetic phenomena.
- [5] IEC 62003:2009 Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Requirements for electromagnetic compatibility testing.
- [6] **Kniaziev V.V.** Standard parameters of the high-power ultrawideband electromagnetic phenomena / V.V. Kniaziev, V.I. Kravchenko // Proc. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 15-19 September, 2014, Kharkiv, Ukraine, P.1-6.
- [7] IEC 62305-1:2010 Protection against lightning – Part 1: General principles.
- [8] Lightning Protection / Edited by Vernon Cooray // Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2010.-1070 p.
- [9] Lightning Electromagnetics / Edited by Vernon Cooray // Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2012.-917 p.
- [10] **Cooray V.** On the possible variation of the lightning striking distance as assumed in the IEC lightning protection standard as a function of structure height / V. Cooray, U. Kumar, F. Rachidi, C. Nucci // Electric power systems research.- 2014.- v.113.- P.79-87.
- [11] CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications.
- [12] **Glebov O.Yu.** Opredeleniye stepeni vliyaniya elektromagnitnykh effektov molnii na obrodovaniye ob'yektov energetiki / O.Yu. Glebov, V.V. Kniaziev, G.M. Koliushko // Vestnik NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazheniy. – Kh.: NTU «KhPI», 2013. – № 60 (1033). – S. 43–51.

# ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НЕОБХОДИМИТЕ НИВА НА УСТОЙЧИВОСТ НА АВТОМАТИЗИРАНИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ КЪМ ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ СМУЩЕНИЯ ОТ РАЗРЯДА НА МЪЛНИИ

*Владимир Князев*

НТУ «ХПИ», НИПКИ «Молния», ул. Шевченко, 47, г. Харьков, 61013, Украина.

*e-mail: knyaz2@i.ua*

*Резюме:* В доклада са представени някои практически аспекти на анализа на функционалната безопасност на съоръжения в условията на действащи външни електромагнитни смущения. Разгледана е методика за хармонизиране на степента на устойчивост на системите за автоматизиран контрол и управление на стратегически обекти, с възможни нива на електромагнитните смущения, съпровождащи разряда на мълнии. Подробно са представени статистически метод за пресмятане плътността на вероятността на ударите на мълния в елементите на обекта и метод за експериментално определяне на каналите за протичане на тока на мълнията. Методите са били експериментално апробирани на енергийни обекти в Украйна.

*Ключови думи:* функционална безопасност, вероятност от удар на мълния, ток на мълнията, ниво на устойчивост.