

УДК 621.316.9

Расчет магнитного поля сеточного экрана при ударах молнии в цепных моделях частотным методом

Д.С. Шишигин¹, С.Л. Шишигин¹, Н.В. Коровкин²

¹ФГБОУВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Российская Федерация

²ФГАОУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: shishigind@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Напряженность импульсного магнитного поля, создаваемого током молнии в местах расположения микропроцессорной аппаратуры, является нормируемым параметром при проектировании молниезащиты электрических подстанций. Арматура стен, металлическая обшивка здания и прочие металлоконструкции играют роль сеточного электромагнитного экрана, ослабляющего внешнее поле. Нормативными документами ФСК ЕЭС допускается проводить расчеты импульсных магнитных полей без экранов с учетом заданного коэффициента ослабления. Но для конкретного объекта с реальными размерами, шагом и другими параметрами сетки погрешность этого коэффициента слишком высока, что ведет к неадекватным проектным решениям. Более точные расчетные выражения предлагает стандарт МЭК-62305-4, однако они получены в предположении идеальных проводников и земли, поэтому требуют систематического анализа на предмет ограничений и точности для реальных экранов с учетом заземлителя. Численные методики позволяют включить экраны в общую расчетную модель проводников подстанции, по которым растекается ток молнии, чтобы проводить расчеты импульсных магнитных полей с погрешностью не более 5 %, установленной нормативами для заземляющих устройств. Трудности представляют расчеты с малым шагом сетки при большом числе стержней. Сокращение времени счета – необходимое условие решения этой задачи.

Методы исследования: Математические модели и методы теории заземлителей использованы для расчета сеточных экранов в частотном диапазоне тока молнии (25 кГц – 1 МГц). Адекватность методики подтверждается сравнением с результатами расчетов и экспериментов, выполненных другими исследователями.

Результаты: Предложен новый вариант частотного метода на основе искусственной периодизации импульса тока молнии без постоянной составляющей, наличие которой снижает точность расчета электромагнитных экранов при близком ударе молнии. За счет исключения постоянной составляющей, четных гармоник, доминирования основной гармоники и быстрого затухания высших гармоник новый вариант на порядок уменьшает число отсчетов при заданной точности по сравнению с традиционным методом.

Выводы: Полученные результаты предназначены для специалистов в области электромагнитной совместимости и проектировщиков электрических подстанций при разработке раздела проекта «Электромагнитная совместимость». Результаты могут быть востребованы при переработке нормативной документации. Новый вариант частотного метода применим в научных исследованиях для широкого круга задач и при разработке программного обеспечения.

Ключевые слова: ток молнии, электрическая подстанция, импульсное магнитное поле, сеточный экран, клетка Фарадея, электромагнитный экран, коэффициент экранирования, стандарт МЭК 62305-4.

Calculation of magnetic field inside a mesh screen at lightning strikes in circuit models by the frequency method

D.S. Shishigin¹, S.L. Shishigin¹, N.V. Korovkin²

¹Vologda State University, Vologda, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

E-mail: shishigind@yandex.ru

Abstract

Background: Impulse magnetic field created by lightning current at the sites of microprocessor equipment location is a rated parameter used to design lightning protection of electric power substations. Reinforcement of walls, metal siding of buildings and other metal structures act as a mesh electromagnetic screen that weakens the external field. According to the regulatory documents of the Federal Grid Company of the Unified Energy System of Russia, the calculations of impulse magnetic fields can be made without screens but with an account for the given damping factor. However, in a real object with real dimensions, interval and other mesh parameters, the error of this factor is too high, which results in inadequate design solutions. The IEC-62305-4 standard suggests more accurate calculation techniques that, however, are based on ideal rod and ground conductivity and require a systematic analysis of the limitations and accuracy of real screens and grounding. Numerical methods allow us to include the screens in the design model of substation conductors in which the lightning current dissipates and thus to calculate the impulse magnetic fields with an error $\leq 5\%$ correspond-

¹ Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» проект RFMEFI58416X0019 «Влияние экспериментально полученных форм импульса тока молнии на механические характеристики композитных структур».

ing to the rated values for grounding devices. However, it is more difficult to deal with small interval meshes with a bigger number of rods. Reduction of the calculation time is a prerequisite for solving this problem.

Materials and methods: Grounding theory mathematical models and methods are used for mesh screen calculation in the frequency range of the lightning current (25 kHz – 1 MHz). The adequacy of the methods is verified by comparing them with other researchers' calculations and experiment results.

Results: In this work, we propose a new variant of the frequency method based on artificial periodization of lightning current impulse without a DC component that reduces the accuracy of electromagnetic screen calculation at a close lightning discharge. By excluding from calculations the DC component, the even harmonics, the domination of the main harmonic component and the rapid decay of higher harmonics, the new variant reduces the counts for the given accuracy compared to the conventional technique.

Conclusions: The obtained results can be used by specialists in the field of electromagnetic compatibility and designers of electric substations in developing the project part «Electromagnetic compatibility». The new variant of the frequency method can be of use in a wider range of scientific studies and in development of computer software.

Key words: lightning current, electric power substation, impulse magnetic field, mesh screen, Faraday cage, electromagnetic screen, screening factor, IEC-62305-4 standard.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.049-058

Введение. Импульсные магнитные поля, создаваемые током молнии, опасны для микропроцессорных систем управления электрической подстанции [1]. Арматура стен, металлическая обшивка здания и прочие металлоконструкции играют роль электромагнитного экрана, существенно ослабляющего магнитное поле в молниевом диапазоне частот (25 кГц – 1 МГц).

Расчет импульсного магнитного поля с учетом экранирования представляет сложную задачу, поэтому для инженерных приложений стандартом ФСК ЕЭС (СТО 56947007-29.240.044-2010) допускается приближенное решение: электромагнитные помехи, найденные без учета экранов, делятся на коэффициенты экранирования, полученные для характерных конструкций экспериментально. Однако погрешность этой методики для конкретного объекта с реальными размерами, шагом и другими параметрами сетки слишком высока, что ведет к неадекватным (затратным) либо недостаточно надежным проектным решениям.

В стандарте МЭК-62305-4 (далее МЭК), который приобрел статус национального стандарта (ГОСТ Р МЭК 62305-4-2016), рассмотрены сеточные экраны при прямом и близком ударе молнии. Значения максимума напряженности магнитного поля и коэффициента экранирования представлены в виде простых аналитических выражений на частотах 25 кГц и 1 МГц в функции геометрических размеров для идеализированных экранов с идеальной проводимостью стержней и земли. Исследование этой инженерной методики производится для реальных экранов с учетом заземлителя, материала, размеров, формы стержней в частотной и временной областях.

Численные методы дают наиболее общий подход к расчету сеточных экранов. Обычно используется метод моментов на основе теории антенн [2–5]. Методы теории антенн, нацеленные на мегагерцовый частотный диапазон, избыточны для частот тока молнии, с одной стороны, и не учитывают ряд важных факторов, с другой. Коэффициент экранирования стального экрана на частоте 25 кГц, например, существенно зави-

сит от внутреннего сопротивления проводников [6], которое в мегагерцовом диапазоне частот пренебрежимо мало по сравнению с внешним индуктивным сопротивлением. Высокая трудоемкость методов теории антенн приводит к ограничениям на размеры экрана и шага сетки. В большинстве работ ток молнии стекает в идеальную землю, что позволяет применить метод зеркальных изображений вместо учета заземлителя. Такая постановка малоприменима при проектировании электрических подстанций (ПС).

Ток молнии через систему молниезащиты ПС растекается по заземляющему устройству (ЗУ), протекает по арматуре и металлической обшивке здания, играющим роль экрана, и затекает внутрь здания по металлоконструкциям и системе уравнивания потенциала. Всю эту сложную систему проводников можно отнести к ЗУ и провести расчеты распределения токов методами теории заземлителей. Однако к настоящему времени этот очевидный подход не реализован как в российских программах, так и мировым лидером расчета ЗУ – американско-канадской фирмой SES (sestech.com). Причина связана с существенным увеличением числа проводников и трудоемкости решения.

В связи с этим необходимо решить ряд задач: повышение точности расчетов электромагнитных экранов (на уровне погрешности не более 5 %), по сравнению с методиками стандартов ФСК ЕЭС и МЭК 62305-4, за счет использования общей расчетной модели экранов и ЗУ, а также учета реальных параметров экрана; сокращение трудоемкости вычислений за счет разработки нового варианта частотного метода на основе искусственной периодизации импульса тока молнии без постоянной составляющей; анализ стандарта МЭК на предмет точности предлагаемой инженерной методики и рекомендаций по ее использованию в практике проектирования электрических подстанций.

Методы исследования. Современная теория заземлителей базируется на цепно-полевой модели тонкого проводника, совместном

использовании методов электромагнитного поля и теории электрических цепей [7, 8].

Заземлитель дробится на элементы малой длины, что позволяет проводить расчеты электромагнитных параметров элементов в статическом приближении. Электрические и магнитные связи между элементами описываются квадратными, полностью заполненными матрицами собственных и взаимных проводимостей, емкостей, индуктивностей. Для проводников в воздухе элементы матрицы проводимостей равны нулю.

Цепная модель заземлителя служит для расчета напряжений и токов элементов. Расчет в частотной области производится в комплексной форме методом узловых напряжений. Частотный метод и метод дискретных схем обычно используются для расчета во временной области при импульсных воздействиях.

По найденным продольным токам элементов в земле и воздухе напряженность магнитного поля рассчитывается по закону Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле является эллиптическим (амплитуда вектора напряженности меняется в течение периода), поэтому расчеты проводятся во временной области и при синусоидальных токах.

Экранирующее действие сеточного экрана в значительной мере зависит от внутреннего сопротивления проводника [6], которое в режиме поверхностного эффекта является функцией частоты. При расчетах во временной области в подобных задачах частотный метод более эффективен, чем метод дискретных схем.

Методика применения частотного метода при импульсных воздействиях известна. В аналитических расчетах используются интегралы Фурье, при численных расчетах импульс искусственно периодизируется (считается периодической функцией), что позволяет разложить его в ряд Фурье.

Импульс тока молнии $f(t)$, заданный дискретно в 2^n узлах (отсчетах) на интервале $[0, T]$, раскладывается в спектр прямым преобразованием Фурье (стандартная функция FFT). Для каждой гармоники производится расчет в частотной области. К решению во временной области приводит обратное преобразование Фурье (стандартная функция IFFT). Необходимость большого числа отсчетов (сотни и тысячи) для описания импульса тока молнии составляет первую проблему в сложных задачах. Вторая проблема специфична. В спектре импульса тока молнии доминирует постоянная составляющая, которая не ослабляется электромагнитным экраном, что приводит в итоге к значительной погрешности.

Улучшить спектр импульсной функции и уменьшить число отсчетов позволяет идея П.Н. Матханова [9]. Импульсная функция продолжается на интервале $2T$:

$$f_2(t) = \begin{cases} f(t), & 0 \leq t \leq T, \\ f(T) - f(t - T), & T < t \leq 2T, \end{cases}$$

а уже затем раскладывается в спектр, однако постоянная составляющая продолжает доминировать.

В данной работе импульсная функция $f(t)$ продолжается на интервале $4T$ (рис. 1,а):

$$f_4(t) = \begin{cases} f_2(t), & 0 \leq t \leq 2T, \\ -f_2(t - 2T), & 2T < t \leq 4T, \end{cases}$$

что позволяет исключить постоянную составляющую и получить спектр с доминированием основной гармоники (рис. 1,б). Выполненная подобным образом искусственная периодизация импульсной функции позволяет проводить расчеты сеточных экранов во временной области до момента времени T при близких ударах молнии. Существенное улучшение спектра импульса, а именно отсутствие постоянной составляющей и четных гармоник, доминирование основной гармоники и быстрое затухание высших гармоник (рис. 1,б), позволяет производить расчеты импульсных процессов с числом отсчетов на порядок и более меньшим, чем в настоящее время, что повышает быстродействие. По этой причине новый вариант частотного метода обладает очевидными преимуществами перед стандартным вариантом.

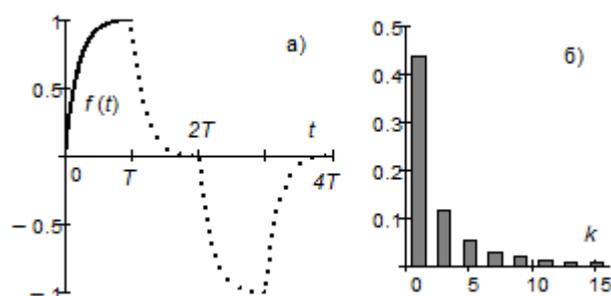


Рис. 1. Продолжение импульсной функции на интервале $4T$ (а) и ее амплитудный спектр (б): k – номер гармоники, основная частота $f_1 = 1/4T$

Существует и теоретический аспект перехода к спектру импульса молнии без постоянной составляющей. Наличие постоянной составляющей в спектре (в математической модели) не соответствует физическим представлениям о природе молнии как о кратковременном, редко повторяющемся в данном месте явлении природы. Известно, что «физичность» математических моделей – необходимое условие их корректности. Перечисленные причины дают основание полагать, что предлагаемый вариант реализации частотного метода обладает общностью.

Численные расчеты выполнены по программе ЗУМ, которая отличается многофункциональностью вычислительного ядра, быстродействием [10], интеграцией с САПР [11]. Достоверность результатов расчета сеточных экранов подтверждается сравнением с экспериментальными и расчетными данными [2], а также данными в [1].

Результаты исследования при прямом ударе молнии в сеточный экран. Экран играет роль клетки Фарадея, где токи, протекающие по разным сторонам, ослабляют магнитное поле внутри экрана.

Напряженность магнитного поля внутри сеточного экрана (рис. 2,а) при ударе молнии в верхний угол экрана, согласно МЭК, равна

$$H = \frac{k_h \cdot I \cdot w}{d_w \sqrt{d_r}}, \quad d_w \geq w, \quad d_r \geq w, \quad (1)$$

где k_h – коэффициент формы волны, «обычно» $k_h = 0,01$; I – ток молнии; w – шаг сетки, м; d_w – минимальное расстояние от расчетной точки до стены экрана, м; d_r – минимальное расстояние от расчетной точки до крыши экрана, м. Стержни и земля приняты идеально проводящими.

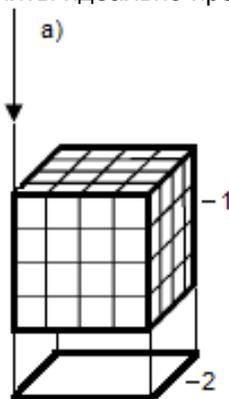


Рис. 2. Сеточный экран (1) 10x10x10 м с шагом сетки w , заземлителем (2): а – при прямом ударе молнии; б – близком ударе молнии (которая моделируется проводником длиной 100 м)

Рассмотрим реальную ситуацию. Экран подключен в 4 угловых точках к контурному заземлителю 10x10 м, расположенному на глубине 0,5 м под экраном (рис. 2,а). Для сравнения с (1) удельное сопротивление земли примем равным $\rho = 1$ Ом·м (практически идеальное заземление).

Для исследования (1) выполним варианты расчеты. При увеличении диаметра стержней от 6 до 25 мм напряженность в центре экрана снижается на 21 % (рис. 3), что объясняется более равномерным распределением тока по экрану.

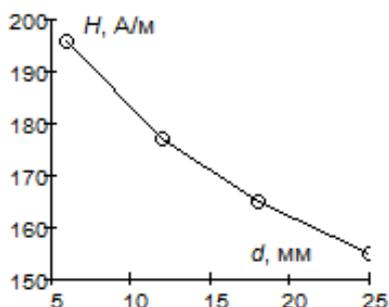


Рис. 3. Напряженность магнитного поля в центре сеточного экрана (рис. 2,а) в зависимости от диаметра медных стержней при шаге сетки $w = 2$ м

Этот фактор в (1) не учитывается. Наилучшее совпадение с (1) получаем при диаметре 8–12 мм, который (12 мм) будем использовать при дальнейших расчетах.

С уменьшением шага сетки напряженность в центре экрана снижается практически линейно (рис. 4). Таким образом, уменьшением шага сетки можно добиться требуемого ограничения напряженности внутри экрана. Численные расчеты дают хорошее совпадение с (1). Совпадение с (1) отмечено и в [2–4].

Замена медных стержней на стальные с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 200$ (рекомендация МЭК) приводит к увеличению напряженности более чем на 20 % по сравнению с медными стержнями (рис. 4).

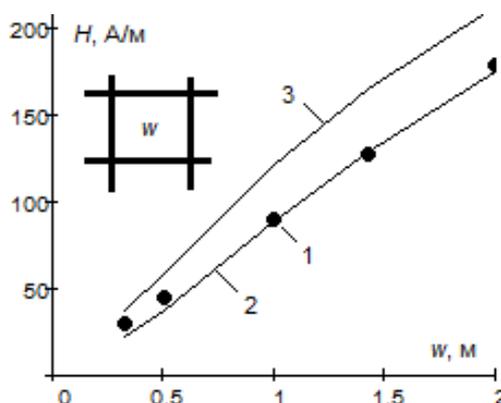


Рис. 4. Напряженность магнитного поля в центре сеточного экрана (рис. 2) в зависимости от шага сетки w : 1 (точки) – данные МЭК; 2 – медный экран с диаметром стержней 12 мм; 3 – стальной экран с диаметром стержней 12 мм, $\mu_r = 200$

Сеточный экран создает защищаемый объем с напряженностью (1) на расстоянии шага сетки w и более от поверхности экрана. Исследуем (1) в этой области. Пусть $d_w = d_r$, т.е. расчетные точки расположены на диагонали куба, шаг сетки $w = 2$ м. Формула (1) дает точное значение на границе и в центре расчетной области, но занижает максимальную напряженность лишь на 10–12 % в промежуточных точках при данных параметрах (рис. 5).

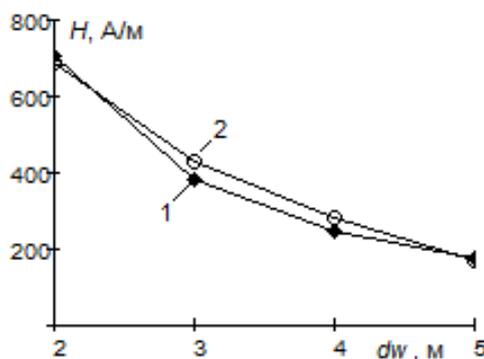


Рис. 5. Напряженность магнитного поля по диагонали кубического экрана ($d_w = d_r$) в функции кратчайшего расстояния до стены с точкой ввода тока молнии: 1 – по формуле (1); 2 – численный расчет

В точке на диагонали с координатами $d_w = d_r = 2$ м имеем $H = 707$ А/м согласно (1) или $H = 692$ А/м при численных расчетах. Сместим расчетную точку на 3 м вдоль одной стены, сохранив условие $d_w = d_r = 2$ м. Напряженность снижается до $H = 457$ А/м (на 34 %), однако по (1) она не меняется. Отсутствие третьей координаты в формуле (1), не позволяющей получить точное решение, не является большим недостатком для инженерных расчетов. Методика расчетов «с запасом» характерна для задач проектирования.

Исследуем влияние длины канала молнии, которую, аналогично МЭК, моделируем проводником с неизменным по длине током 100 кА, частотой 25 кГц. Без учета канала молнии погрешность недопустимо велика (рис. 6). Минимальная длина канала молнии должна быть в несколько раз больше расстояния до расчетной точки. Длина 100 м, предложенная в МЭК, удовлетворяет этому требованию для большинства объектов.

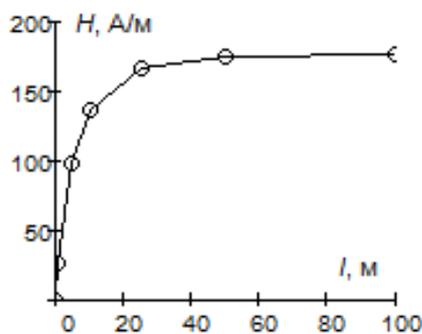


Рис. 6. Напряженность магнитного поля в центре сеточного экрана (рис. 2,а) в зависимости от длины канала молнии

Существенное влияние на распределение тока стержней экрана и напряженность внутри экрана оказывает заземлитель. В нашей задаче экран подключен к заземлителю в 4 угловых точках, что является типовым решением (рис. 2,а). Пусть удельное сопротивление грунта $\rho = 1000$ Ом·м. Отсоединим от заземлителя ближайший к источнику тока угол экрана. Напряженность в центре экрана снижается со 180 до 127 А/м (на 29 %). Отсоединим дальний от источника угол. Напряженность увеличивается со 180 А/м до 230 А/м (на 28 %). Несимметричное подключение заземлителя существенно влияет на распределение тока стержней и напряженности внутри экрана. Аналогичное влияние оказывает несимметрия заземлителя. Таким образом, формула (1), полученная в предположении идеального заземления, применима только при симметрии заземлителя и равномерном подключении к нему экрана.

Проверим рекомендацию МЭК, по которой расчеты напряженности при первом импульсе тока молнии можно проводить на эквивалентной частоте 25 кГц. Действительно, максимумы напряженности, рассчитанные во временной области при импульсе тока длительностью 10/350 мкс с линейным фронтом, хорошо согласуются с расчетами на частоте 25 кГц. Таким об-

разом, данная рекомендация оправдана для случая прямого удара молнии.

Результаты исследования при близком ударе молнии (рис. 2,б). Сеточная конструкция играет роль электромагнитного экрана, принцип действия которого основан на возникновении вихревых токов, своим магнитным полем ослабляющих внешнее поле.

По МЭК, коэффициент экранирования (ослабления) магнитного поля сеточного экрана с медными стержнями на частоте 25 кГц равен, дБ,

$$SF = 20 \log \frac{8,5}{w}, \quad (2)$$

где w – шаг сетки, м.

Для экрана со стальными стержнями (при $\mu_r = 200$) на частоте 25 кГц

$$SF = 20 \log \frac{8,5}{w \sqrt{1 + 18/r^2}}, \quad (3)$$

где r – радиус стальных стержней, мм.

На частоте 1 МГц коэффициент экранирования стального экрана определяется по формуле (2), как для медного экрана.

Выполним численные расчеты. Канал молнии моделируется стержнем длиной 100 м с током 100 кА. Результаты мало зависят от расстояния до канала молнии, которое примем равным 50 м. Расчетная точка расположена в центре экрана.

Исследуем влияние шага сетки на коэффициент экранирования. С увеличением шага коэффициент экранирования уменьшается по гиперболическому закону подобно (2), (3). Численные значения коэффициента экранирования (рис. 7) меньше на 40–45 % по сравнению с численными значениями коэффициента экранирования по МЭК (формулы (2)–(3)).

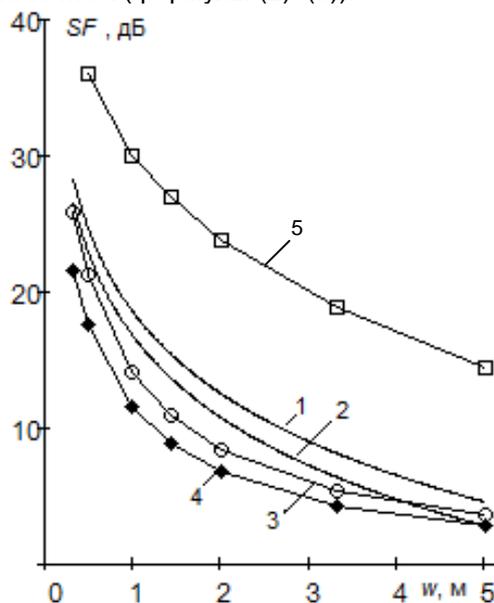


Рис. 7. Коэффициент экранирования сеточного экрана (рис. 2,б) в зависимости от шага сетки w : 1 – по формуле (2); 2 – по формуле (3); 3 – стержни медные; 4 – стержни стальные (диаметр 12 мм, $\mu_r = 200$); 5 – сетка пластин шириной w , толщиной 1 мм

Замена медных стержней на стальные (рис. 7) снижает коэффициент экранирования несколько больше, чем при переходе по МЭК (формулы (2)–(3)).

Коэффициент экранирования зависит от формы стержней. Заменяем круглые проводники пластинами шириной w , так чтобы они касались друг друга. Коэффициент экранирования существенно возрастает (рис. 7, график 5). Подобная сетка пластин может рассматриваться в качестве модели металлической обшивки зданий на ПС.

Длина канала молнии существенно влияет на точность расчетов. Угол между прямой, проведенной из конца канала молнии в расчетную точку, и каналом молнии не должен превышать 40° (рис. 8). К подобной оценке можно прийти и на основе закона Био-Савара-Лапласа.

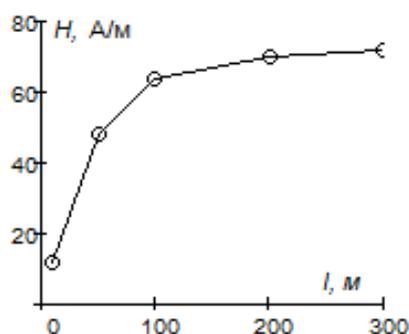


Рис. 8. Напряженность магнитного поля в центре сеточного экрана (рис. 2,б) в зависимости от длины канала молнии

Увеличение диаметра стержней с 6 до 25 мм приводит к увеличению коэффициента экранирования на 30 % (рис. 9).

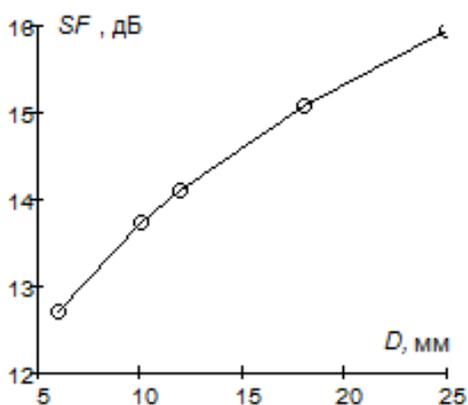


Рис. 9. Коэффициент экранирования сеточного экрана (рис. 2,б) с шагом сетки $w = 1$ м на частоте 25 кГц в функции диаметра медных стержней

Исследуем влияние размеров экрана на коэффициент экранирования. При увеличении размера кубического экрана коэффициент экранирования существенно возрастает (рис. 10), что объясняется увеличением числа контуров с вихревым током. Этот существенный фактор не учитывается в (2). Отсюда различие (2) и численных расчетов (рис. 7). Коэффициент экранирования в

середине экрана больше, чем вблизи поверхности (рис. 10).

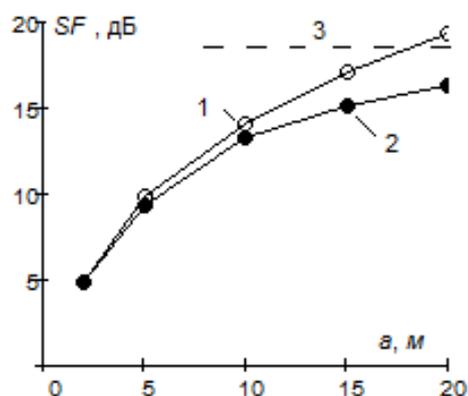


Рис. 10. Коэффициент экранирования сеточного экрана кубической формы с шагом сетки $w = 1$ м на частоте 25 кГц в зависимости от размера стороны a : 1 – в центре экрана; 2 – на расстоянии w от поверхности экрана; 3 – по формуле (2); (стержни медные)

Рассмотрим частотные характеристики сеточного экрана. В диапазоне от 100 Гц до 1 МГц коэффициент экранирования медного экрана практически не зависит от частоты и близок к своему максимальному значению (рис. 11). Таким образом, медный экран эффективно ослабляет внешнее поле во всем частотном диапазоне тока молнии. Коэффициент экранирования стального экрана возрастает с увеличением частоты, достигая максимального значения на частоте порядка 1 МГц. Здесь эффективность стального и медного экранов одинакова (рис. 11).

Частотные характеристики коэффициента экранирования различных экранов из конструкционной стали приведены в [1]. Для варианта с шагом сетки 40 см имеем хорошее совпадение с данными [1] (рис.11).

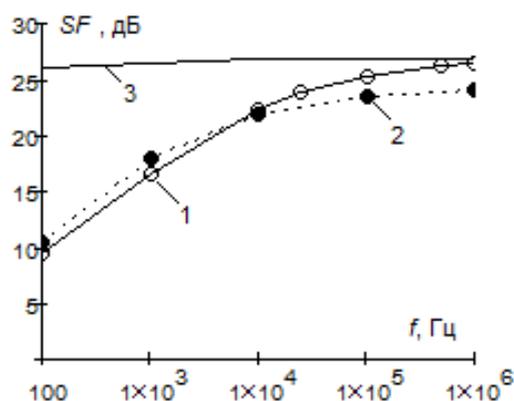


Рис. 11. Напряженность магнитного поля в центре сеточного экрана (рис. 2,б) с шагом сетки $w = 0,4$ м: 1 – стержни стальные; 2 – стержни стальные, по данным [1, с. 469]; 3 – стержни медные (диаметр стержней 25 мм, сталь $\mu_r = 200$)

Причину различия медного и стального экранов поясним на модельной задаче (рис. 12).

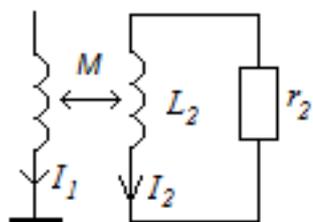


Рис. 12. К расчету вихревого тока экрана

Пусть ток I_1 индуцирует вихревой ток

$$I_2 = \frac{-j\omega M \cdot I_1}{r_2 + j\omega L_2}$$

При малом активном сопротивлении $r_2 \ll \omega L_2$, что характерно для медных стержней, токи изменяются в противофазе, поэтому коэффициент ослабления внешнего поля максимальный и не зависит от частоты. Активное сопротивление стальных стержней на низких частотах соизмеримо с индуктивным сопротивлением. Токи не находятся в противофазе, что снижает коэффициент экранирования. С увеличением частоты соотношение активного и индуктивного сопротивления меняется в пользу последнего, что приводит к увеличению коэффициента экранирования. На частотах порядка 1 МГц активное сопротивление стального стержня мало по сравнению с индуктивным сопротивлением, поэтому различие между стальным и медным экранами нивелируется.

Перейдем к анализу сеточного экрана во временной области. Найдем напряженность магнитного поля в центре экрана при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА длительностью 10/350 мкс (рис. 13). Для экрана с медными стержнями напряженность повторяет форму тока источника, а максимальное значение, определенное в момент максимума тока, практически совпадает с расчетом на эквивалентной частоте.

Для экрана со стальными стержнями напряженность уже не повторяет форму тока источника, максимум напряженности значительно запаздывает по сравнению с максимумом тока (рис. 13). Этот эффект отмечен и в [3].

Причина в следующем. В момент завершения фронта импульса и перехода на пологий участок спада тока индуктивная составляющая напряжения резко уменьшается (в 70 раз при импульсе 10/350 мкс с линейным фронтом), доля активной составляющей резко возрастает, что приводит к снижению коэффициента экранирования. Более того, в отдельные моменты времени ток экрана действует согласно с током молнии, что приводит к смещению максимума напряженности далеко за фронт волны. Эквивалентная частота напряженности, определенная в момент его максимума, в несколько раз меньше эквивалентной частоты тока, поэтому расчеты на эквивалентной частоте становятся неадекватными.

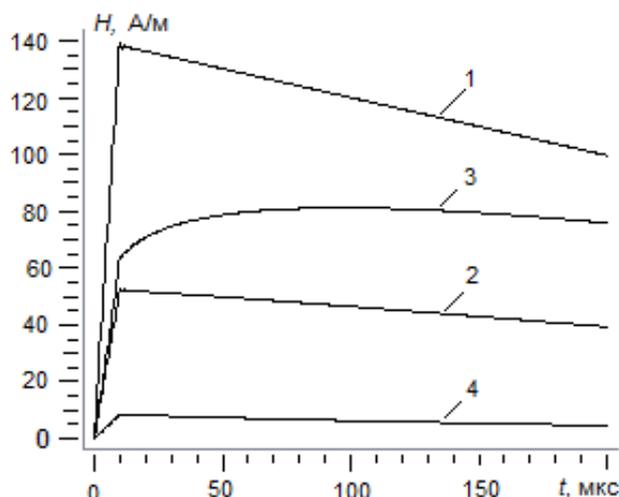


Рис. 13. Напряженность магнитного поля в центре сеточного экрана (рис. 2,б) с шагом сетки $w = 2$ м при импульсе тока молнии 100 кА длительностью 10/350 мкс: 1 – без экрана; 2 – стержни медные; 3 – стержни стальные ($\mu_r = 200$); 4 – сетка стальных пластин шириной w

В отличие от стержней, активное сопротивление стальной пластины мало по сравнению с индуктивным сопротивлением (из-за большого периметра пластины), поэтому временные характеристики сетки стальных пластин аналогичны сетке медных стержней (рис. 13).

Таким образом, формула (3), предполагающая расчеты на эквивалентной частоте 25 кГц, дает завышенные значения коэффициента экранирования для экранов из стальных стержней. При близком ударе молнии расчеты сеточных экранов необходимо проводить во временной области.

Сравнение результатов численного исследования с экспериментом. Частотные характеристики коэффициента экранирования магнитного поля одиночным и двойным сеточным экраном в поле антенны (рис. 14) получены экспериментально [2]. Экран состоит из каркаса (стальной уголок 40x40x4 мм) и сетки (стальная проволока диаметром 2,8 мм), устанавливается и подключается к стальной сетке (с шагом 35 мм), которая моделирует идеально проводящую землю. Для измерения напряженности магнитного поля использована рамочная антенна, установленная (на деревянном табурете) в центре экрана на высоте 65 см.

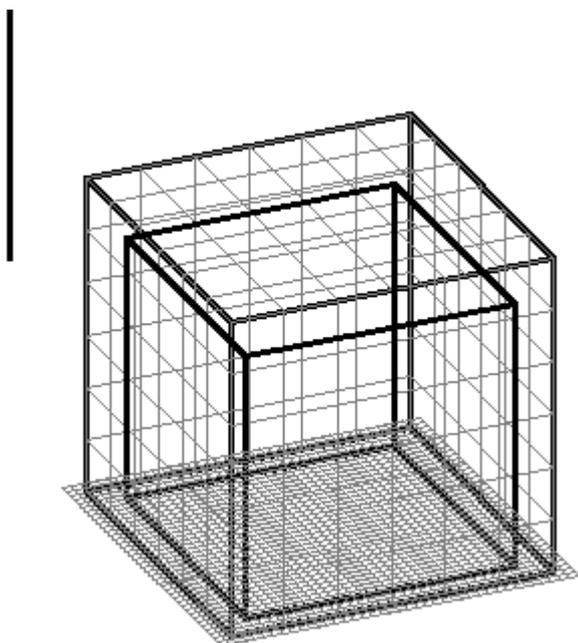


Рис. 14. Стальной сеточный экран кубической формы: А1 – размера 1,8х1,8х1,8 м с шагом сетки $w = 30$ см; А2 – как А1, но $w = 15$ см; А3 – размера 1,5х1,5х1,65 м с шагом $w = 30$ см; А4 – двойной экран из А1 и А3; антенна длиной 30 м расположена на расстоянии 3 м от края экрана

Результаты измерений [2] для четырех опытов (одиночный экран А1, одиночный экран А2, одиночный экран А3 и двойной экран А4, состоящий из экранов А1 и А3 (рис. 14)) представлены в таблице. Там же приведены расчеты по программе ФЕКО, выполненные авторами [2]. Наши расчеты по программе ЗУМ хорошо согласуются как с экспериментальными, так и с расчетными данными [2] (см. таблицу).

Коэффициенты экранирования магнитного поля на частоте 1 МГц (в дБ)

Номер опыта	А1	А2	А3	А4
Измерение	12,3	17,3	10,7	17,1
Расчет ФЕКО	13,3	19,5	12,4	20,3
Расчет ЗУМ	12,6	18,5	10,9	18,9
Формула (2)	29	35	29	

Вернемся к анализу стандарта МЭК. Расчеты, выполненные по формуле (2) для стальных экранов на частоте 1 МГц, сильно отличаются от экспериментальных данных (см. таблицу). Причина в том, что коэффициенты экранирования существенно зависят от размеров экрана (рис. 10). Формулы (2), (3) применимы для экранов размера порядка 10 м, они не являются универсальными.

По действующим стандартам, коэффициент экранирования двойного экрана допускается находить как сумму коэффициентов экранирования (в дБ) его составляющих. Эксперименты [2], расчеты по программе ФЕКО [2], а также наши расчеты приводят к существенно меньшим результатам. Этот факт объясняется сильным вза-

имным влиянием токов экранов, ослабляющих друг друга.

Выводы. Стандарт МЭК (ГОСТ Р МЭК 62305-4-2016) предлагает простой инженерный подход к расчету напряженности магнитного поля внутри сеточного экрана при прямом и близком ударе молнии.

Формула (1) дает напряженность в произвольной точке внутри сеточного экрана при прямом ударе молнии. В действительности расчетные точки описываются двумя координатами, поэтому расположены на диагонали и под диагональю, проведенной из точки ввода тока молнии. В остальных точках решение производится «с запасом». Уменьшение шага сетки – основной способ снижения напряженности.

Формула (1) получена без учета внутреннего сопротивления стержня, что допустимо для медных стержней. Для стальных стержней напряженность увеличивается на 20 % и более (в зависимости от шага сетки). Диаметр стержней также относится к числу неучтенных в (1) факторов. При увеличении диаметра с 6 до 25 мм напряженность снижается на 21 %.

Формула (1) получена в предположении идеального заземления. В грунте с низкой проводимостью заземлитель и выбор точек заземления экрана существенно влияют на распределение тока молнии по элементам экрана, а следовательно, и на степень ослабления внешнего поля. Без учета этих факторов формула (1) может приводить к существенным погрешностям.

При близком ударе молнии коэффициент экранирования сеточного экрана зависит от шага сетки, габаритов экрана, материала, диаметра или формы стержней. Для экранов больших размеров необходимо учитывать неоднородность поля внутри экрана. Формула (2) учитывает только шаг сетки и материал стержней. Без учета габаритов экрана она носит частный характер для экранов размера 10–20 м и пригодна лишь для оценочных расчетов.

Формулы (1), (2), (3) получены на частоте 25 кГц для первого импульса тока молнии. Расчеты во временной области при импульсе тока с линейным фронтом длительностью 10/350 мкс подтвердили обоснованность подобной замены для (1), (2), но не подтвердили для (3). Причины этого эффекта для сетки из стальных стержней связаны с резким увеличением доли внутреннего активного сопротивления после фронта импульса тока, который приводит к снижению коэффициента экранирования на 20 % и более (в зависимости от шага сетки, диаметра стержней, относительной магнитной проницаемости).

Отметим две практические важные задачи с сеточными экранами, которые не решает стандарт МЭК. Металлоконструкции здания на ПС обычно играют роль сетки Фарадея и электромагнитного экрана одновременно, поскольку молниеотводы и металлоконструкции связаны через общее ЗУ. Модульные здания ПС «обши-

ты» металлическими панелями, поэтому помимо сетки стержней необходимо рассматривать сетки тонких пластин.

Современное программное обеспечение позволяет проводить расчеты, не прибегая к инженерным методикам. В частотном диапазоне тока молнии математические модели, методы теории заземлителей наиболее эффективны для расчета сеточных экранов произвольной конструкции.

Список литературы

1. **Электромагнитная** совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
2. **Maksimowicz T., Aniserowicz K.** Investigation of models of grid-like shields subjected to lightning electromagnetic field: Experiments in the frequency domain // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2012. – Т. 54, № 4. – С. 826–836.
3. **Metwally I.A., Heidler F.H.** Reduction of lightning-induced magnetic fields and voltages inside struck double-layer grid-like shields // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2008. – Т. 50, № 4. – С. 905–912.
4. **Transient** analysis of soil resistivity influence on lightning generated magnetic field / F. Grange, S. Journet, S. Fortin, F. Dawalibi // Lightning Protection (XII SIPDA), 2013 International Symposium. – Belo Horizonte, Brazil, 2013. – С. 192–196.
5. **Araneo R., Lovat G., Celozzi S.** Shielding effectiveness of periodic screens against finite high-impedance near-field sources // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2011. – Т. 53, № 3. – С. 706–716.
6. **Шапиро Д.Н.** Электромагнитное экранирование. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2010. – 120 с.
7. **Шишигин С.Л.** Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. – 2010. – № 1. – С. 16–23.
8. **Коровкин Н.В., Шишигин С.Л.** Расчетные методы в теории заземления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – Вып. 1(166). – С. 74–79.
9. **Матханов П.Н.** Основы анализа электрических цепей: Линейные цепи. – М.: Высш. шк., 1981. – 333 с.
10. **Шишигин Д.С.** AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов элек-

троэнергетики // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 9. – С. 28–32.

11. **Шишигин Д.С.** К выбору технологии интеграции прикладного программного обеспечения с САПР // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 4(47). – С. 211–224.

References

1. Dyakov, A.F., Maksimov, B.K., Borisov, R.K., Kuzhekin, I.P., Zhukov, A.V. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike i elektrotekhnike* [Electromagnetic compatibility in power industry and electrical engineering]. Moscow, Energoatomizdat, 2003. 768 p.
2. Maksimowicz, T., Aniserowicz, K. Investigation of models of gridlike shields subjected to lightning electromagnetic field: Experiments in the frequency domain. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, vol. 54, no. 4, pp. 826–836.
3. Metwally, I.A., Heidler, F.H. Reduction of lightning-induced magnetic fields and voltages inside struck double-layer grid-like shields. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, vol. 50, no. 4, pp. 905–912.
4. Grange, F., Journet, S., Fortin, S., Dawalibi, F. Transient analysis of soil resistivity influence on lightning generated magnetic field. Lightning Protection (XII SIPDA), 2013 International Symposium. Belo Horizonte, Brazil, 2013, pp. 192–196.
5. Araneo, R., Lovat, G., Celozzi, S. Shielding effectiveness of periodic screens against finite high-impedance near-field sources. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, vol. 53, no. 3, pp. 706–716.
6. Shapiro, D.N. *Electromagnitnoe ekranirovanie* [Electromagnetic screening]. Dolgoprudnyy, Izdatel'skiy dom «Intellekt», 2010. 120 p.
7. Shishigin, S.L. *Elektrichestvo*, 2010, no. 1, pp. 16–23.
8. Korovkin, N.V., Shishigin, S.L. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2013, issue 1(166), pp. 74–79.
9. Matkhanov, P.N. *Osnovy analiza elektricheskikh tsepey: Lineynye tsepi* [Fundamentals of electric circuit analysis. Linear circuits]. Moscow, Vysshaya shkola, 1981. 333 p.
10. Shishigin, D.S. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2014, no. 9, pp. 28–32.
11. Shishigin, D.S. *Trudy SPIIRAN*, 2016, no. 4(47), pp. 211–224.

Шишигин Дмитрий Сергеевич,
ФГБОУВО «Вологодский государственный университет»,
преподаватель кафедры электротехники,
e-mail: shishigind@yandex.ru
Shishigin Dmitry Sergeyevich,
Vologda State University,
Lecturer of the Electrical Engineering Department,
e-mail: shishigind@yandex.ru

Шишигин Сергей Леонидович,
ФГБОУВО «Вологодский государственный университет»,
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой электротехники,
e-mail: shishigind@yandex.ru

Shishigin Sergei Leonidovich,
Vologda State University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Associate Professor, Head of the Electrical Engineering
Department,
e-mail: shishigind@yandex.ru

Коровкин Николай Владимирович,
ФГАОУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической электротехники и электромеханики,
e-mail: shishigind@yandex.ru
Korovkin Nikolai Vladimirovich,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor, Head of the Department of Theoretical Electrical
Engineering and Electromechanics,
e-mail: shishigind@yandex.ru