

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СЕТОЧНЫХ ЭКРАНОВ ПРИ УДАРЕ МОЛНИИ И АНАЛИЗ СТАНДАРТА МЭК 62305-4

Введение

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

Нормативные документы и инженерные методики. Расчет импульсного магнитного поля с учетом экранирования представляет сложную задачу, поэтому для инженерных приложений стандартом ФСК ЕЭС [2] допускается приближенное решение: электромагнитные помехи, найденные без учета экранов, делятся на некоторые усредненные коэффициенты экранирования (Таблица 1).

Таблица 1

Коэффициент экранирования магнитного поля стенами зданий
[2, Таб. 3. 2]

Здание	Кирпичное	С металлическим каркасом	Из сборного железобетона
на частоте 25 кГц	3	10	30
на частоте 1 МГц	3	8	20

В стандарте МЭК-62305-4 (далее МЭК) рассмотрены сеточные экраны при прямом и близком ударе молнии. Значения максимума напряженности магнитного поля и коэффициента экранирования представлены в виде простых аналитических выражений в функции шага сетки на частотах 25 кГц и 1 МГц для идеализированных экранов с идеальной проводимостью стержней и земли. Достоверность расчетных выражений МЭК при прямом ударе молнии подтверждена в работах [3-5]. В то же время, существуют экспериментальные исследования [3], ставящие под сомнение расчетные выражения при близком ударе молнии. В условиях, когда стандарт МЭК приобрел статус национального стандарта ГОСТ Р МЭК 62305-4-2016 необходимость его систематического исследования и обсуждения перед внедрением в практику проектирования молниезащиты в России, не вызывает сомнений.

Выбор численной методики. Теория антенн, обычно используемая для расчета сеточных экранов в мегагерцовом (и выше) диапазоне частот [3-6], избыточна в килогерцовом диапазоне частот тока молнии с одной стороны и недостаточна с другой. Теория заземлителей здесь эффективней по нескольким причинам. Взаимные индуктивности и емкости вычисляются аналитически (в теории антенн численно из-за учета запаздывания волны), что кардинально повышает быстродействие. Внутреннее сопротивление проводников, которое определяет коэффициент экранирования стального экрана на частоте 25 кГц [7], учитывается в теории заземлителей, но не учитывается в теории антенн (в мегагерцовом диапазоне частот им можно пренебречь).

На электрических подстанциях системы молниезащиты, экранирования и заземления гальванически связаны. Ток молнии протекает по молниеотводу, далее через заземлитель растекается по арматуре и металлической обшивке здания и затекает внутрь здания по металлоконструкциям и системе уравнивания потенциала. Для расчета электромагнитных процессов и полей в этой сложной системе проводников применимы модели, методы и программы теории заземлителей [8-11].

Современная теория заземлителей базируется на цепно-полевой модели тонкого проводника, совместном использовании методов электромагнитного поля и теории электрических цепей в частотной и временной области [8, 9].

Заземлитель дробится на элементы малой длины, что позволяет проводить расчеты электромагнитных параметров элементов (матриц проводимостей, индуктивностей и емкостей) аналитически, в статическом приближении. Расчет тока элементов производится в многозвенной цепной модели, которая создается автоматически. Напряженность магнитного поля рассчитывается по закону Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле синусоидального тока является эллиптическим (амплитуда вектора напряженности меняется в течение периода), поэтому расчеты проводятся во временной области не только при импульсных, но и при синусоидальных токах.

Целью настоящей работы применение методов теории заземлителей для расчета сеточных экранов; анализ стандарта МЭК 62305-4 на предмет точности предлагаемой там инженерной методики; разработка сеточной модели тонкой пластины и расчет магнитных полей в модульных каркасных зданиях, обшитых металлическими панелями, при ударах молнии.

1. Прямой удар молнии в сеточный экран

Принцип действия экрана. Экран играет роль клетки Фарадея, где токи, протекающие по разным сторонам, ослабляют магнитное поле внутри экрана.

По МЭК напряженность магнитного поля внутри сеточного экрана (рис. 1а) при ударе молнии в верхний угол экрана 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.

В настоящей работе рассматривается реальная ситуация. Экран подключен в 4 угловых точках к контурному заземлителю 10х10 м, расположенному на глубине 0,5 м под экраном (рис. 1а). Для сравнения с (1) удельное сопротивление земли примем равным $\rho = 1$ Ом·м (практически идеальное заземление).

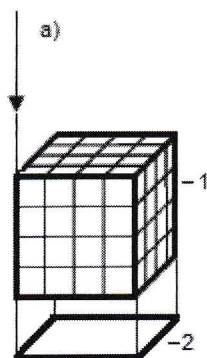


Рис. 1. Сеточный экран (1) 10×10×10 м с шагом сетки w , заземлителем (2) при: а) прямом ударе молнии, б) близком ударе молнии, которая моделируется проводником длиной 100 м

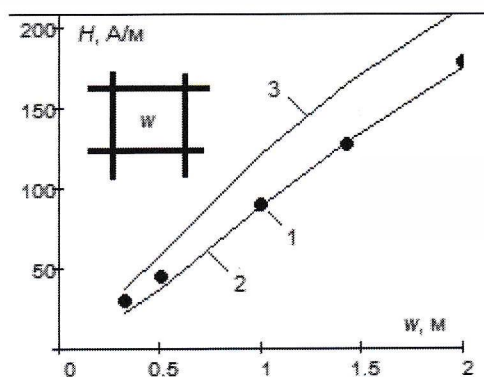


Рис. 2. Напряженность магнитного поля в центре сеточного экрана (рис. 1) в зависимости от шага сетки w : 1 (точки) – данные МЭК, 2 – медный экран, 3 – стальной экран ($\mu_r = 200$)

При увеличении диаметра стержней от 6 до 25 мм напряженность в центре экрана снижается на 21 % [12], что объясняется более равномерным распределением тока по экрану. 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. 2). 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 работах [3-5].

Замена медных стержней на стальные с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 200$ (рекомендация МЭК), приводит к увеличению напряженности более чем 20 % по сравнению с медными стержнями (рис. 2).

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. 3). 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.

Существенное влияние на распределение тока стержней экрана и напряженности внутри экрана, оказывает заземлитель. В нашей задаче экран подключен к заземлителю в 4 угловых точках, что является типовым решением (рис. 1). Пусть удельное сопротивление грунта $\rho = 1000$ Ом·м. Отсоединим от заземлителя ближайший к источнику тока угол экрана. Напряженность в центре экрана снижается со 180 А/м до 127 А/м (29 %). Отсоединим дальний от источника угол. Напряженность увеличивается со 180 А/м до 230 А/м (28 %). Можно выбрать форму заземлителя таким образом, чтобы продольные токи заземлителя ослабляли бы магнитное поле в центре экрана в несколько раз. Таким образом, формула (1), полученная в предположении идеального заземления, применима только при симметрии заземлителя и равномерном подключении к нему экрана.

Расчеты проводились в частотной и временной области. Максимумы напряженности, рассчитанные во временной области при импульсе тока длительностью 10/350 мкс с линейным фронтом, хорошо согласуются с расчетами на эквивалентной частоте 25 кГц. Таким образом, рекомендация стандарта МЭК – проводить расчеты на эквивалентной частоте, оправдана при прямом ударе молнии.

2. Близкий удар молнии к сеточному экрану

Принцип действия экрана. Сеточная конструкция (рис. 1б) 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

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

где $w > 8,5$ – шаг сетки (м).

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

$$SF = 20 \log \frac{8,5}{w\sqrt{1+18/r^2}}, \text{ дБ} \quad (26)$$

где r – радиус стержней (мм). На частоте 1 МГц коэффициент экранирования стального экрана определяется по формуле (2a), как для медного экрана.

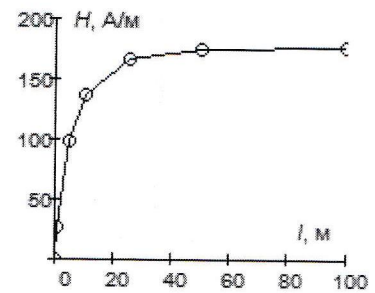


Рис. 3. Напряженность магнитного поля в центре сеточного экрана (рис. 2а) в зависимости от длины канала молнии

Выполним численные расчеты. Канал молнии моделируется стержнем длиной 100 м с током 100 кА. Расстояние до канала молнии примем равным 50 м, чтобы рассматривать плоскую волну (согласно МЭК), но использовались и другие значения. Расчетная точка расположена в центре экрана.

Анализ формулы (2). При исследовании влияния шага сетки на коэффициент экранирования установлено существенное различие численных расчетов и расчетов по формуле (2) (рис. 4). Причина в том, что в (2) не учитываются размеры экрана. С увеличением размера экрана коэффициент экранирования существенно возрастает (рис. 5), поэтому формула (2) применима только для экранов с размерами 15–20 м.

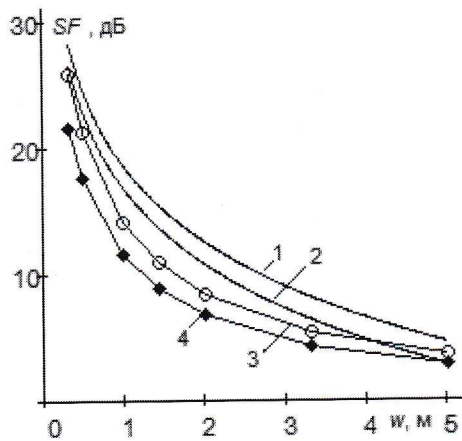


Рис. 4. Коэффициент экранирования сеточного экрана (рис. 2б) в зависимости от шага сетки w : 1 – по формуле (2а), 2 – по формуле (2б), 3 – стержни медные, 4 – стержни стальные (диаметр 12 мм, $\mu_r = 200$)

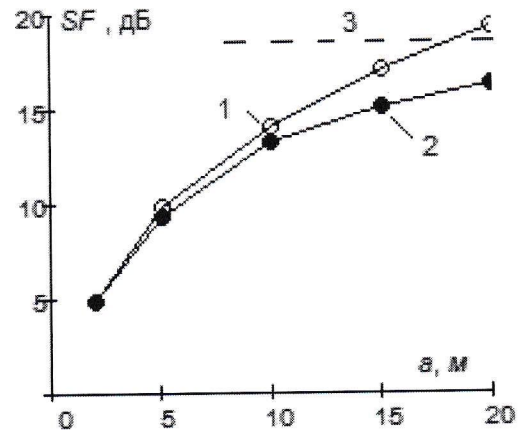


Рис. 5. Коэффициент экранирования сеточного экрана кубической формы с шагом сетки $w = 1$ м на частоте 25 кГц в зависимости от размера стороны a : 1 – в центре экрана, 2 – на расстоянии w от поверхности экрана, 3 – по формуле (2а); (стержни медные)

Не шаг сетки, как в формуле МЭК, а число контуров с вихревыми токами (величина вихревого тока) определяют коэффициент экранирования. Вместо $1/w$ в (2) следует использовать параметр a/w , где a – линейный размер экрана. Вместо (2а) мы можем предложить простую эмпирическую формулу для кубического экрана

$$SF = 20 \log \frac{a}{w}, \quad a \geq 5, \quad w \leq 2,$$

однако считаем, что подбор эмпирических формул не имеет перспектив даже для инженерных расчетов, при наличии компьютерных программ.

Эксперименты польских исследователей [3] подтверждают наши выводы о некорректности (2). В работе [3] частотные характеристики коэффициента экранирования магнитного поля одиночным и двойным сеточным экраном в поле антенны (рис. 6) получены экспериментально. Экран состоит из каркаса (стальной уголок $40 \times 40 \times 4$ мм) и сетки (стальная проволока диаметром 2,8 мм). Экран 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.

Результаты измерений [3] для четырех опытов: одиночный экран А1, одиночный экран А2, одиночный экран А3 и двойной экран А4, состоящий из экранов А1 и А3 (рис. 6), представлены в Таблице 2. Там же приведены расчеты по программе ФЕКО. Наши расчеты по программе ЗУМ хорошо согласуются как с экспериментальными, так и расчетными данными [3] (таблица 2).

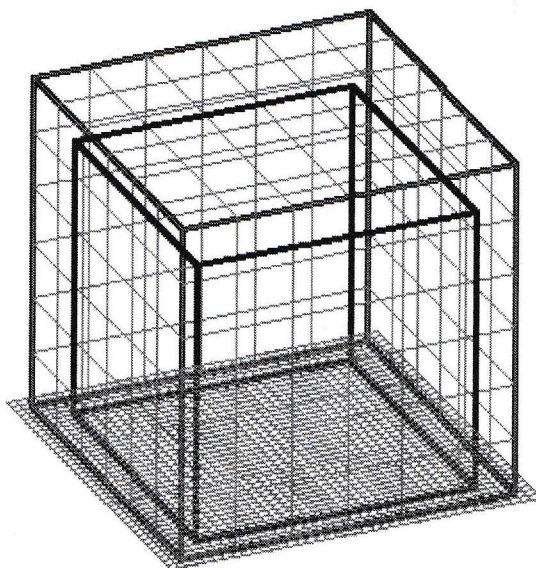


Рис. 6. Стальной экран: А1 – размером $1,8 \times 1,8 \times 1,8$ м с шагом сетки $w = 30$ см, А2 – как А1, но $w = 15$ см, А3 – размером $1,5 \times 1,5 \times 1,65$ м с шагом $w = 30$ см, А4 – двойной экран из А1 и А3; антенна длиной 30 м расположена на расстоянии 3 м от края экрана

Вернемся к анализу стандарта МЭК. Расчеты, выполненные по формуле (2а) для стальных экранов на частоте 1 МГц сильно отличаются от экспериментальных данных (таблица 2). Причина в том, что коэффициенты экранирования существенно зависят от размеров экрана (рис. 5). Формулы (2) не являются универсальными. В стандарте МЭК следовало бы указать ограничения формулы (2), например, для экранов с размерами 10 м и более.

Коэффициент экранирования двойного экрана нельзя (даже в первом приближении) находить как сумму коэффициентов экранирования (в дБ) его составляющих, что допускают нормативные документы. Эксперименты [3], расчеты по программе ФЕКО [3], а также наши расчеты приводят к существенно меньшим результатам. Этот факт объясняется сильным взаимным влиянием токов экранов, ослабляющих друг друга.

Таблица 2

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 (2а)	29	35	29	

Таким образом, формулы (2) требуют корректировки с учетом размеров экрана или указания ограничений на их использование. От эмпирических формул, которые в данных задачах не могут быть одновременно простыми и достаточно точными, пора уже вообще отказаться в пользу применения компьютерных программ.

Погрешность расчетов на эквивалентной частоте. Найдем напряженность магнитного поля в центре экрана при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА длительностью 10/350 мкс (рис. 7). Для экрана с медными стержнями напряженность повторяет форму тока источника, а максимальное значение, определенное в момент максимума тока, совпадает с расчетом на эквивалентной частоте (26,9 А/м).

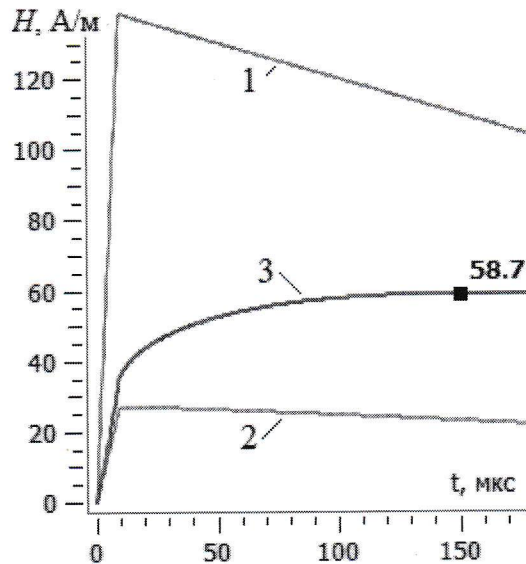


Рис. 7. Напряженность магнитного поля в центре сеточного экрана (рис. 2б) с шагом сетки $w = 1$ м при импульсе тока молнии 100 кА длительностью 10/350 мкс: 1 – без экрана, 2 – стержни медные, 3 – стержни стальные, $\mu_r = 200$

Для экрана со стальными стержнями напряженность уже не повторяет форму тока источника, максимум напряженности значительно запаздывает по сравнению с максимумом тока (рис. 7). Этот эффект отмечен и в [4].

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 (этот эффект подробно исследован в [12]). 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 неточны.

Действительно, для стального экрана максимум напряженности (58.7 А/м) в 1,63 раза больше, чем в момент завершения фронта волны (36 А/м) и при расчете на эквивалентной частоте тока 25 кГц (36 А/м).

Таким образом, формула (2б), предполагающая расчеты на эквивалентной частоте 25 кГц, дает завышенные значения коэффициента экранирования стальных экранов. Чем меньше шаг сетки, тем этот эффект сильнее. При близком ударе молнии расчеты сеточных экранов со стальными стержнями необходимо проводить во временной области.

3. Сеточная модель металлических панелей зданий

Стандарт МЭК рассматривает сеточные экраны с заданным шагом и диаметром стержней, что подходит для арматуры сборных железобетонных конструкций. Но на электрических подстанциях чаще используются сборные конструкции из металлического каркаса, обшитого трехслойными сэндвич панелями.

Панели изолированы от каркаса, но имеют точечные гальванические контакты с ним в местах крепления саморезами (рис. 8) с шагом порядка 0,5-1 м. Края панелей (по длине) имеют замки, которые исключают щели, но не создают непрерывный гальванический контакт между панелями. Тем не менее, точечные контакты между панелями, несомненно, воз-

никают при ударах молнии. Между торцами панелей есть зазор, поэтому здесь также имеет место только точечный контакт в местах крепления панели (саморезами) к металлическому каркасу (рис. 8).

Коэффициент экранирования подобных экранов, определенный экспериментально, составляет $SF = 16.9-18.1$ дБ [13], близкое значение $SF = 18-20$ дБ установлено в стандарте [2] (таблица 1). Моделирование каркасных зданий с металлическими панелями в виде сплошного электромагнитного экрана с отверстиями (окна, двери), не является адекватным, поскольку завышает коэффициент экранирования почти на 2 порядка [13]. Причина – в отсутствии непрерывного гальванического контакта между панелями. В то же время, указанные значения ($SF = 17-20$ дБ) соразмерны с коэффициентами экранирования сеточных экранов (рис. 4–6).

Сеточная модель металлической панели. Панель представляет собой тонкую пластину заданной толщины (примем 1 мм), которая дробится на элементы квадратной (прямоугольной в общем случае) формы с размерами, равными шагу сетки (рис. 9). Принимается, что в пределах каждого элемента ток протекает только в направлении оси. Таким образом, панель моделируется сеткой элементарных пластин. Элементы с ортогональными токами перекрывают друг друга.

Внутреннее сопротивление пластины с учетом проникновения электромагнитной волны с одной стороны равно [14, С. 155].

$$z = \frac{l \cdot p}{\omega \cdot \gamma} \operatorname{cth}(pd) = r + jx, \quad p = \sqrt{j\omega\mu\gamma},$$

где l – длина, w – ширина, d – толщина, ω – угловая частота, μ – магнитная проницаемость, γ – удельная проводимость пластины. Методика моделирования сопротивлений с множителем $\sqrt{j\omega}$ во временной области разработана в [8].

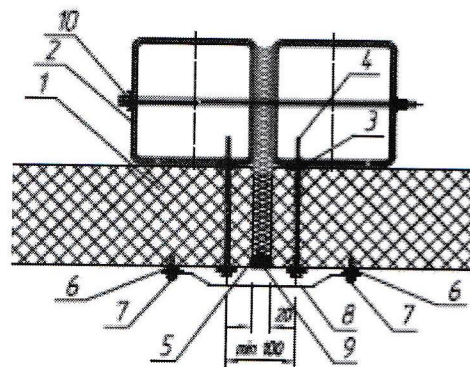


Рис. 8. Крепление стеновой панели:

- 1– Стеновая панель, 2–Металлическая стойка,
- 3– Уплотнительная лента, 4– Саморез, 5–Утеплитель,
- 6– Герметик, 7– Саморез, 8– Нащельник, 9 – Прокладка,
- 10– Шпилька, 4 гайки и шайбы

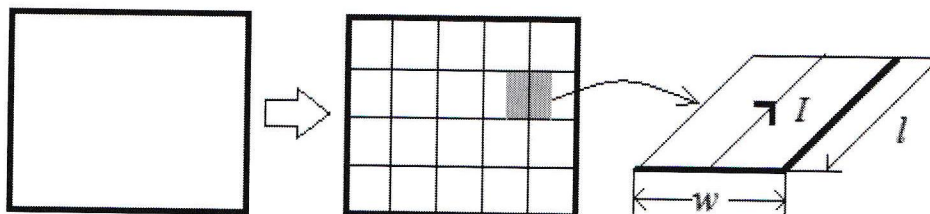


Рис. 9. Дискретизация тонкой пластины на элементы

Собственная внешняя индуктивность квадратной пластины ($l = w$) получается аналитически

$$M_{ii} = \frac{\mu_0 w}{\pi} \ln(1 + \sqrt{2}).$$

Такой же индуктивностью обладает проводник круглого сечения диаметром $d = 1/2 \sqrt{2} = 0,35w$. В другом предельном случае, при $l \gg w$ диаметр $d = w/e = 0,37w$. Тогда пластину можно приближенно заменить стержнем с эквивалентным диаметром $d = 0,36w$.

Взаимная индуктивность между двумя элементарными пластинами получается численным интегрированием по формулам Гаусса. Но если применить формулу средних прямоугольников, то весь ток пластины протекает по ее оси, а сетка пластин становится сеткой стержней с эквивалентным диаметром \bar{d} , найденным ранее. Этот подход позволяет приближенно рассчитывать сетку пластин по программам, предназначенным для расчета типовых сеточных экранов.

Экспериментальные исследования с двумя катушками, между которыми располагается металлический лист, в целом подтверждают достоверность разработанной модели.

Таким образом, сборные здания из металлического каркаса, обшитого металлическими панелями, моделируются сложным сеточным экраном, состоящим из стержней и пластин. Пластины имеют точечный контакт со стержнями и между собой в местах крепления (саморезами) с шагом, определенным технологией монтажа панели.

4. Магнитное поле внутри здания с металлическими панелями

Рассмотрим каркасное здание, собранное из отдельных модулей и обшитое металлическим сайдингом (рис. 10).

Примем, что каждая стеновая панель крепится к каркасу 6 саморезами (в углах и в середине панели). Пол и крышу моделируем сплошными металлическими пластинами. Ток молнии 100 кА с частотой 25 кГц протекает по молниеотводу, длина которого вместе с каналом молнии составляет 100 м. Шаг сетки $w = 0,5$ м, средних панелей $w = 0,1$ м (фокусировка), что позволяет проводить расчеты вблизи панелей.

Выберем расчетные точки на прямой, проходящей через середину средней панели до центра здания. Распределение напряженности магнитного поля представлено на рис. 11. Экран ослабляет магнитное поле внутри и несколько усиливает снаружи.

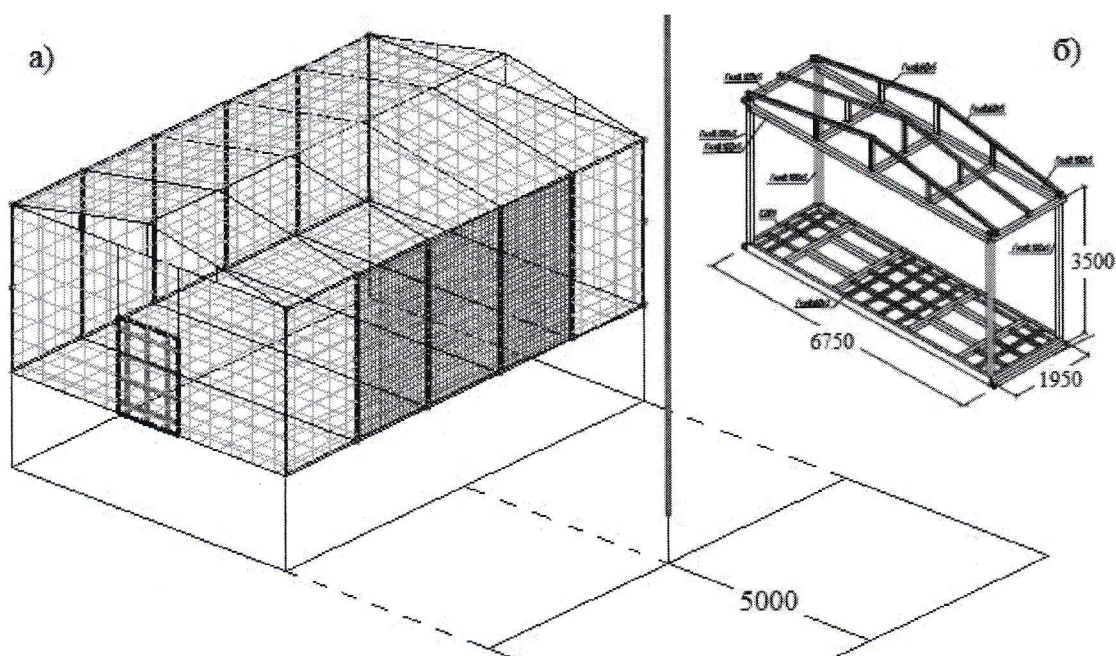


Рис. 10. Модель сборного здания (а) из модулей (б); пунктирные линии – в варианте с общим заземлителем

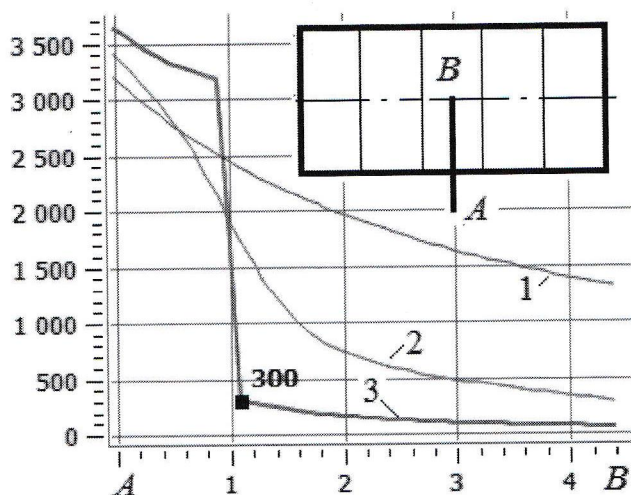


Рис. 11. Распределение модуля напряженности магнитного поля на уровне 1750 мм от пола по линии АВ: 1 – без каркаса и панелей; 2 – только каркас здания; 3 – каркас с панелями (расстояние до молниеотвода 5 м, заземлители здания и молниеотвода не связаны)

Коэффициенты экранирования магнитного поля приведены в таблице 2. Каркас без панелей способен заметно (на 13 дБ) ослабить магнитное поле в центре здания, но не у стены (менее 3 дБ на расстоянии 0,1 м от стены). С панелями коэффициент экранирования составляет 27 дБ в центре и 18 дБ у стены. Последний результат согласуется с [13]. Таким образом, панели увеличивают коэффициент экранирования на 14–15 дБ (и более).

При использовании общего заземлителя здания и молниеотвода (рис. 10), что характерно для электрической подстанции, часть тока молнии протекает по каркасу и панелям здания, которые играют роль электромагнитного экрана и клетки Фарадея одновременно. Имеем близкий и прямой удар молнии одновременно, что снижает коэффициенты экранирования тем больше, чем больше несимметрия протекающего по экрану тока молнии.

Таблица 2

Коэффициенты экранирования магнитного поля каркасом и панелями здания

	Каркас	Каркас + Панели
У стены (на расстоянии 0,1 м)	2,7 (2,7*) дБ	18 (16,2*) дБ
В центре	13,2 (13,2*) дБ	27,4 (26,7*) дБ

* С общим заземлителем (рис. 10).

Выводы

1. Формула (1) стандарта МЭК дает инженерный подход к расчету напряженности магнитного поля внутри сеточного экрана при прямом ударе молнии, который предполагается в угол экрана (худший случай). Расчетные точки в (1) описываются двумя координатами, поэтому они расположены на диагонали и под диагональю, проведенной из точки ввода тока молнии. В остальных точках решение производится «с запасом». К неучтенным факторам в (1) относится диаметр и материал стержней, что допустимо для инженерных расчетов. Формула (1) получена в предположении идеального заземления, поэтому в реальных задачах она применима при симметрии заземлителя и точек заземления экрана.

2. Формула (2) стандарта МЭК предлагает простой инженерный подход к расчету напряженности магнитного поля внутри сеточного экрана при близком ударе молнии в функции шага сетки и материала стержней. Но без учета размеров экрана она носит частный характер и

пригодна для экранов размером 10–20 м. Необходимо учитывать неоднородность поля внутри экрана – вблизи экрана напряженность больше, чем в середине. Замена первого импульса тока молнии эквивалентной синусоидой с частотой 25 кГц не является обоснованной для стальных экранов, где напряженность существенно запаздывает по сравнению с током молнии.

3. Применение инженерных формул типа (1), (2) считаем нецелесообразным, учитывая сложность задач и наличие компьютерных программ.

4. Металлические панели, используемые для обшивки зданий из металлического каркаса, моделируются сетками пластин. Панели имеют точечные контакты с каркасом в местах крепления саморезами. Панели существенно (на 14–15 дБ в рассмотренной задаче) увеличивают коэффициент экранирования магнитного поля каркаса.

5. На электрических подстанциях системы молниезащиты, экранирования и заземления гальванически связаны. Расчет электромагнитных процессов и полей в этой сложной системе проводников целесообразно проводить с использованием моделей, методов и программ теории заземлителей.

Список литературы

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Дьяков А. Ф., Максимов Б. К., Борисов Р. К., Кужекин И. П., Жуков А. В. // М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
2. СТО 56947007-29. 240. 044-2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. Стандарт Организации ОАО «ФСК ЕЭС». М. 2010.
3. 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.
4. 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.
5. Grange F. et al. Transient analysis of soil resistivity influence on lightning generated magnetic field //Lightning Protection (XII SIPDA), 2013 International Symposium on – IEEE, 2013. – С. 192–196.
6. 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.
7. Шапиро Д. Н. Электромагнитное экранирование //Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект». – 2010. – 120 с.
8. Шишигин С. Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. – 2010. – № 1. – С. 16–23.
9. Коровкин Н. В., Шишигин С. Л. Расчетные методы в теории заземления. Научно-технические ведомости СПбГПУ // Изд-во СПбГПУ. Вып. 1(166). – 2013. – С. 74–79.
10. Шишигин Д. С. AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики // 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.
12. Шишигин Д. С., Шишигин С. Л., Коровкин Н. В. Расчет магнитного поля сеточного экрана при ударах молнии в цепных моделях частотным методом // Вестник ИГЭУ. – 2018. – № 1. – С. 49–58.
13. Березуцкий Г. А., Коротаев И. А., Крусс А. М., Чан Жу Тин О. А., Овсянников А. Г. Оценка экранирующих свойств зданий с металлической заземленной облицовкой // Третья Российская конф. по заземляющим устройствам. – Сб. докл., Новосибирск: Сибир. энергет. академия. – 2008. – С. 65–70.
14. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.