

УДК 51.73

doi: 10.53816/20753608_2025_2_63

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ, НАВОДИМЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСОМ ГРОВОГО РАЗРЯДА**

**METHOD FOR CALCULATING CURRENTS AND VOLTAGES INDUCED
BY THE ELECTROMAGNETIC PULSE OF A LIGHTNING DISCHARGE**

По представлению чл.-корр. РАН О.А. Толтегина

А.Н. Павшин, Д.К. Щеглов

Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод»

A.N. Pavshin, D.K. Shcheglov

Статья посвящена анализу воздействия электромагнитных импульсов грозовых разрядов на электрическую сеть. Предложена методика расчета амплитудно-временных параметров напряжений и токов, наводимых электромагнитным импульсом. Выполнен анализ результатов расчета, а также рассматриваются наиболее подходящие средства защиты оборудования.

Ключевые слова: электромагнитный импульс, грозовой разряд, моделирование, методика, энергосистема, живучесть.

The article is devoted to the analysis of the effect of electromagnetic pulses of lightning discharges on the electrical network. A method for calculating the amplitude-time parameters of voltages and currents induced by an electromagnetic pulse is proposed. The calculation results are analyzed, and the most appropriate equipment protection measures are considered.

Keywords: electromagnetic pulse, lightning discharge, modeling, methodology, power system, survivability.

Введение

В настоящее время микропроцессорные устройства и программируемые контроллеры стали неотъемлемыми элементами аппаратуры управления режимами работы электроэнергетического оборудования систем электроснабжения (СЭС). Однако, несмотря на повышение эффективности СЭС благодаря быстрдействию микропроцессорной техники, они стали более уязвимы перед непредсказуемыми природными явлениями, такими как грозовые разряды (ГР), оказывающие разрушительное воздействие на энергосистему.

В связи с этим возникает объективная необходимость в разработке эффективных методик расчета наведенных токов и напряжений от электромагнитного импульса (ЭМИ) ГР. Такие методики позволят оценить потенциальные риски для электронных систем и разработать соответствующие меры защиты.

Статья посвящена анализу и систематизации современных подходов к вычислению изменений параметров электрических сетей, вызванных воздействием молнии. При этом основное внимание уделяется обеспечению живучести электрооборудования в условиях таких экстремальных событий.

Современные исследования в области электродинамики и электромагнитной совместимости раскрывают сложные взаимосвязи между ГР и электрическими системами и подчеркивают важность углубленного анализа наведенных токов и напряжений, возникающих при воздействии ЭМИ, для точного определения их воздействия на инфраструктуру и оборудование. Так, в работе Д.Е. Тереньтева и Н.Л. Сторожука [1] рассматриваются технические и технологические вопросы защиты оборудования и объектов связи от опасных электромагнитных влияний и предлагаются меры по минимизации негативных последствий таких воздействий. Исследования Л.Н. Качиева, Н.В. Балюка и П.В. Степанова [2] посвящены изучению воздействия мощного ЭМИ на электронные средства и предлагают методы защиты от таких воздействий, а также исследования посвящены разработке рекомендаций по обеспечению стойкости электронной техники.

Среди зарубежных исследований следует выделить работу Daniel L. Stein [3], посвященную изучению влияния ЭМИ на радиоаппаратуру и другие электронные компоненты связи, а также исследование А.Н. Kalma и С.Ј. Fischer [4], посвященное анализу влияния ЭМИ на электрическую сеть при помощи светодиодов путем измерения уменьшения показателей светоотдачи после воздействия ЭМИ.

Особого внимания заслуживает методика физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи для прогнозирования помехоустойчивости элементов вычислительной техники при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты здания, предложенная Э.И. Павловой и З.М. Гизатуллиным [5]. Целью их работы является повышение живучести и устойчивости работы электронных устройств в условиях воздействия природных электромагнитных явлений.

Другие работы в данной области посвящены разработке методик защиты от ЭМИ оборудования трансформаторных подстанций (ТП) и предлагают улучшения существующих методов защиты, а также исследуют воздействие ЭМИ на микропроцессорные устройства на основе углеродных нанокompозитных материалов.

Настоящая работа дополняет систему знаний об электромагнитных воздействиях ГР, стре-

мясь реализовать последние достижения в этой области для эффективного преодоления вызовов современной технологической среде. Особое внимание уделено вопросам разработки систем защиты, адаптированных к уникальным характеристикам ГР, и развитию более эффективных технологий для предотвращения повреждений и обеспечения надежной работы электрооборудования СЭС.

Целью исследования является уменьшение последствий воздействия наводимых токов и напряжений на СЭС, подверженных ЭМИ, за счет совершенствования существующих методов расчета наведенных токов и напряжений.

В рамках предлагаемой статьи цель достигается за счет последовательного решения следующих задач:

1. Разработка методики расчета, учитывающей особенности воздействия ЭМИ ГР, с применением современных численных методов;
2. Исследование влияния ГР на СЭС для выявления потенциальных угроз и необходимости улучшения систем защиты;
3. Разработка на основе полученных результатов рекомендаций по повышению эффективности систем защиты.

Методика расчета токов и напряжений, наводимых ЭМИ

На рис. 1 приведен пример формализованного описания процесса расчета наводимых токов и напряжений ЭМИ в виде контекстной функциональной модели IDEF0 (диаграммы уровня A1) с «точки зрения» инженера-проектировщика.

Как видно на рис. 1, процесс расчета токов и напряжений, наводимых ЭМИ, включает в себя определение амплитудно-временных параметров этих токов и напряжений. На этапе исследования влияния токов и напряжений анализируются параметры, такие как частота, амплитуда и продолжительность воздействий, чтобы выявить потенциальные угрозы. На основе исследований разрабатываются рекомендации по улучшению защиты и надежности СЭС. Это включает в себя использование устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП), которые помогают снизить амплитуды напряжений и токов, вызванных ЭМИ. Использование математических моделей и методов для расчета токов и

напряжений включает в себя телеграфные уравнения и другие аналитические инструменты для точного определения воздействий ЭМИ на СЭС.

Расчет электрофизических характеристик кабельных линий

Кабельные линии (КЛ) представляют собой конструкции, состоящие из проводных электрических цепей, в которых учитываются параметры цепей: «защитный экран» (далее по тексту — «экран — земля», «жила — земля» и «жила — экран»).

Основной спектр частот, оказывающий приоритетное влияние на формирование токов и напряжений в цепях КЛ, подверженных воздействию полей ЭМИ ГР, не превышает 20 кГц. Поэтому электрофизические характеристики КЛ рассчитываются применительно к низкочастотным электромагнитным воздействиям [6].

Цепь «экран — земля»

КЛ представляет собой однородную цепь с возвратом тока через землю. Под экраном кабеля понимается система электропроводящих элементов, включающих оболочку, броню, а также другие проводящие конструкции (электростатические экраны, защитные экра-

ны от механических повреждений и т.п.), соединенные между собой параллельно. Цепь «экран — земля» обладает четырьмя первичными параметрами: омическим сопротивлением R_2 , Ом/м; индуктивностью цепи L_2 , Гн/м; емкостью цепи C_2 , Ф/м; удельной электрической проводимостью G_2 , См/м.

Омическое сопротивление цепи определяется как сумма сопротивлений всех проводящих и непроводящих элементов кабеля. При воздействиях ЭМИ ГР активное сопротивление экрана кабеля равно омическому сопротивлению, при этом потери на гистерезис в стальных лентах брони не учитываются. Омическое сопротивление сплошной оболочки $R_{2об}$, Ом/м, брони $R_{2бр}$, Ом/м, плетеной оболочки $R_{2пл}$, Ом/м, внешняя индуктивность оболочки $L_{2вн}$, Гн/м, и внутренняя индуктивность брони $L_{2вн}$, Гн/м, рассчитываются по формулам [7]:

$$R_{2об} = \frac{1}{(r_2^2 - r_1^2) \pi \cdot \sigma_m};$$

$$R_{2бр} = \frac{\pi \cdot D_{ср}}{a_{бр}^2 \cdot b_{бр} \cdot \sigma_m};$$

$$R_{2пл} = \frac{2}{\beta \cdot \pi^2 \cdot \cos^2 a \cdot d_{п} \cdot D_{ср} \cdot \sigma_m};$$

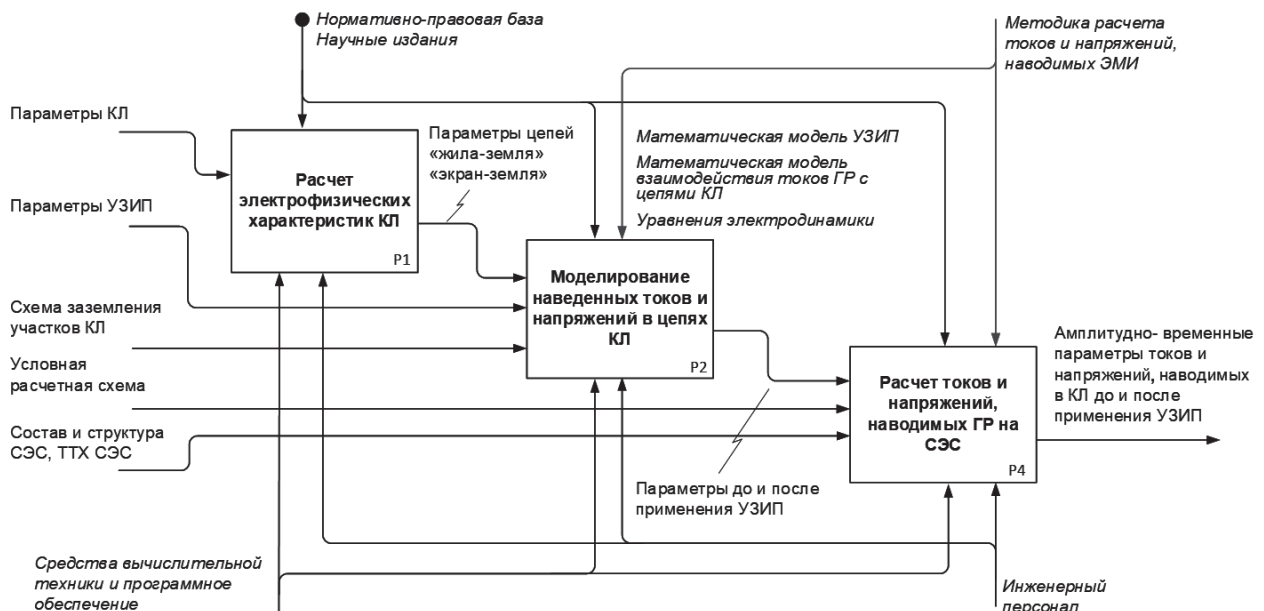


Рис. 1. Формализованное описание процесса расчета токов и напряжений, наводимых ЭМИ

$$L_{2\text{вн}} = 2 \cdot 10^{-7} \times \left(\ln \frac{1}{1,26 \cdot r_2 \sqrt{2\pi \cdot 10^{-7} \cdot \omega \cdot \sigma_2}} + \frac{1}{2} \right);$$

$$L_{2\text{вт}} = 10^{-7} \frac{1,5 \cdot \pi \cdot \mu_{\text{бр}} \cdot b_{\text{бр}}}{a_{\text{бр}}},$$

где r_1, r_2 — внутренний и внешний радиусы оболочки, м;

σ_m — проводимость материала оболочки, оплетки или брони, См/м;

$D_{\text{ср}}$ — средний диаметр брони (оплетки), м;

$a_{\text{бр}}$ — внутренний радиус брони, м;

$b_{\text{бр}}$ — внешний радиус брони, м;

β — коэффициент заполнения оплетки;

α — угол наклона жгутов оплетки относительно оси кабеля, градус;

d_n — диаметр проволоки оплетки, м;

ω — угловая частота, рад/с;

σ_2 — проводимость грунта, См/м;

$\mu_{\text{бр}}$ — относительная магнитная проницаемость лент брони.

Радиус внутренней $a_{\text{бр}}$ и внешней $b_{\text{бр}}$ брони можно рассчитать по следующим формулам:

$$a_{\text{бр}} = a + \Delta, \text{ м};$$

$$b_{\text{бр}} = n \cdot b - \frac{n \cdot b}{a_{\text{бр}}} \Delta, \text{ м},$$

где a — ширина ленты, м;

Δ — зазор между витками ленты (в случае перекрытия имеет знак «минус»), м;

n — число лент брони;

b — толщина одной ленты, м.

Внутренняя индуктивность оболочки, выполненной из немагнитных материалов, принимается равной нулю. Омическое сопротивление экрана кабеля, содержащего несколько оболочек, определяется по формулам расчета сопротивлений параллельных проводников.

При наличии постоянной гальванической связи экрана кабеля с землей емкость цепи «экран — земля» не учитывается, а переходная удельная электрическая проводимость G_2 , Ом/м, рассчитывается по формуле [7]:

$$G_2 = \frac{\pi \cdot \sigma_2}{\ln \left(\frac{1,128}{2\sqrt{r_2 \cdot h}} \right)},$$

где h — глубина прокладки кабеля, м;

δ — эквивалентная глубина проникновения поля в грунт, м,

$$\delta = \sqrt{\frac{10^7}{2\pi \cdot \omega \cdot \sigma_2}}.$$

В КЛ, изолированных от земли диэлектрическим шлангом, проводимость цепи «экран-земля» не учитывается, а емкость цепи C_2 , Ф/м, рассчитывается по формуле [10]:

$$C_2 = \frac{\epsilon_{\text{из}}}{18 \cdot \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right)} \cdot 10^{-9},$$

где $\epsilon_{\text{из}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции экрана;

r_3 — наружный радиус покрытия, м.

Цепь «жила — экран»

Омическое сопротивление цепи «жила — экран» R_1 , Ом/м, определяется по формуле [10]:

$$R_1 = \frac{1}{\pi \cdot r_0^2 \cdot \sigma_{\text{ж}}},$$

где r_0 — радиус жилы, м;

$\sigma_{\text{ж}}$ — проводимость материала жилы, См/м.

Индуктивность L_{12} , Гн/м и емкость цепи «жила — экран» C_{12} , Ф/м, при расположении жилы по оси кабеля рассчитываются по формулам [10]:

$$L_{12} = 2 \cdot \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) \cdot 10^{-7};$$

$$C_{12} = \frac{\epsilon_1 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right)},$$

где ϵ_1 — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции жилы.

При смещении жилы от центра кабеля индуктивность L_{12} , Гн/м и емкость цепи

«жила — экран» C_{12} , Ф/м, рассчитываются по формулам [10]:

$$L_{12} = 2 \cdot \left[\ln(r_1/r_0) - \frac{\Theta^2}{1 - \delta_0^2} \right] \cdot 10^{-7};$$

$$C_{12} = \frac{\varepsilon_1 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \left[\ln(r_1/r_0) - \frac{\Theta^2}{1 - \delta_0^2} \right]},$$

где Θ — эксцентриситет жилы, определяется отношением расстояния от жилы до центра кабеля к внутреннему радиусу оболочки;

$\delta_0 = r_0/r_1$ — отношение радиуса жилы к радиусу кабеля.

Сопротивление связи кабеля равно омическому сопротивлению экрана кабеля. Коэффициент распространения γ , 1/м, и волновое сопротивление Z_B , Ом, цепей «экран — земля» и «жила — экран», рассчитываются по формулам [7]:

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y};$$

$$Z_B = \sqrt{\frac{Z}{Y}},$$

где $Z = R + i\omega L$ — продольное полное сопротивление на единицу длины кабеля, Ом/м;

R — внутреннее сопротивление земли и кабеля, Ом/м;

$i\omega L$ — реактивное сопротивление изолирующего зазора кабеля, Ом/м;

$Y = G + i\omega C$ — поперечная полная проводимость на единицу длины кабеля, См/м;

G — полная проводимость земли, См/м;
 $i\omega C$ — емкостная проводимость изоляции, См/м.

Математические модели и методы расчета токов и напряжений

Электромагнитные поля, генерируемые токами ГР, непосредственно воздействуют на электрооборудование и аппаратуру, а также наводят токи и напряжения в соединительных КЛ. Анализ параметров ГР показывает, что их спектр охватывает как низкие, так и высокие частоты, что связано с различными фазами разряда и характером возникающих электромагнитных волн.

Поэтому расчет параметров токов и напряжений, наводимых указанными электромагнитными воздействиями в КЛ, должен выполняться без учета зависимости электрофизических характеристик КЛ от частоты.

Уравнения электродинамики

КЛ состоят из цепей «жила — экран» и «экран — земля». Процессы взаимодействия токов ГР с цепями КЛ описываются уравнениями электродинамики (уравнениями Максвелла). Однако решение таких уравнений связано с высокой вычислительной сложностью. Поэтому наводки в кабелях рассчитываются обычно с использованием модели линии передачи (обобщенные телеграфные уравнения, являющиеся следствием уравнений Максвелла) [6]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial U_1}{\partial x} = R_1 I_1 + L_1 \frac{\partial I_1}{\partial t} + M \frac{\partial I_2}{\partial t} - E(x, t); \\ -\frac{\partial U_2}{\partial x} = R_2 I_2 + L_2 \frac{\partial I_2}{\partial t} + M \frac{\partial I_1}{\partial t} - E(x, t); \\ -\frac{\partial I_1}{\partial x} = G_{12}(U_1 - U_2) + C_{12} \frac{\partial (U_1 - U_2)}{\partial t}; \\ -\frac{\partial I_2}{\partial x} = G_{12}(U_2 - U_1) + C_{12} \frac{\partial (U_2 - U_1)}{\partial t} + G_2 U_2 + C_2 \frac{\partial U_2}{\partial t}, \end{cases}$$

где U_1, U_2 — напряжения в цепях «жила — земля» и «экран — земля» кабелей;

R_1, R_2 — погонные сопротивления жил и экранов кабелей;

I_1, I_2 — токи в жилах и экране кабелей, соответственно;

L_1, L_2 — погонные индуктивности цепей «жила — экран» и «экран — земля» кабелей;

M — индуктивность взаимного влияния между жилами и экраном кабелей;

$E(x, t)$ — распределенная по длине КЛ электродвижущая сила (э.д.с.), моделирующая напря-

женность электрического поля ЭМИ и ГР, воздействующего на КЛ;

C_{12}, G_{12}, C_2, G_2 — погонные емкости и проводимости цепей «жила — экран» и «экран — земля» кабелей.

Схемы замещения участка КЛ, подверженного воздействию токов ГР, приводится на рис. 2.

Для КЛ, подверженной воздействию молнии, ток молниевых разряда моделируется одним источником э.д.с., который размещается в области контакта канала молнии с линией. Для защиты КЛ от воздействия ГР применяется устройство защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП).

Граничные условия, отображающие математическую модель УЗИП, выполненных на базе нелинейных ограничителей перенапряжений, включенных в цепь между жилами и экранами кабеля, описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} I_C(t) = C_H \frac{dU(t)}{dt}; \\ U_3(t) = I_R(t) \cdot R_H + L_H \frac{dI_R(t)}{dt}; \\ U_3(t) = R_3(I_3(t)) \cdot I_3(t); \\ I_\Sigma(t) = I_C(t) + I_R(t) + I_3(t) + K_{\text{ж}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $I_C(t)$, $I_R(t)$ — токи в сосредоточенных нагрузках C_H , R_H ;

C_H, R_H, L_H — сосредоточенное сопротивление, индуктивность и емкость оборудования в узлах кабельных линий;

$U(t)$ — напряжение между жилами и экраном кабеля;

$U_3(t)$ — падение напряжения на нелинейном элементе УЗИП;

R_3 — сопротивление нелинейного элемента УЗИП, зависящее от величины протекающего через него тока $I_3(t)$;

$I_3(t)$ — ток, протекающий через УЗИП;

$I_\Sigma(t)$ — суммарный ток в жилах;

$K_{\text{ж}}$ — число жил в кабеле.

Условная схема подключения УЗИП приведена на рис. 3.

В указанной математической модели связь между падением напряжения на нелинейном сопротивлении УЗИП U_3 и током I_3 , протекающим через него, определяется через статическое сопротивление. Это сопротивление определяется из отношения напряжения к току, протекающему через УЗИП в каждой точке вольтамперной характеристики, что соответствует тангенсу угла α между осью абсцисс и прямой, проходящей через начало координат и точку на вольтамперной характеристике. При переходе от одной точки вольтамперной характеристики к другой статическое сопротивление изменяется (рис. 4) [9].

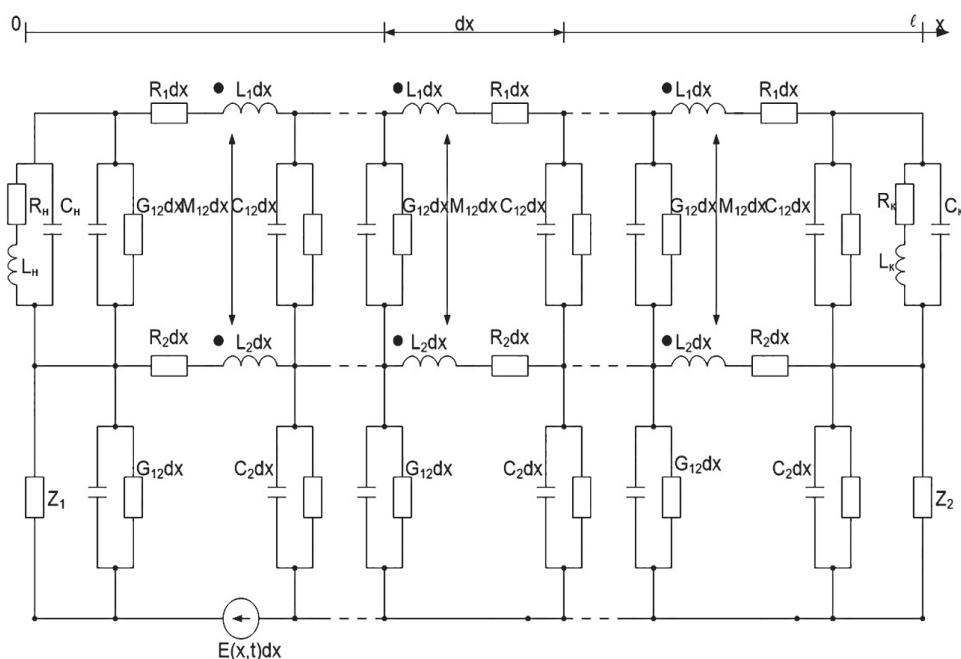


Рис. 2. Схема замещения участка КЛ, подверженного воздействию токов ГР

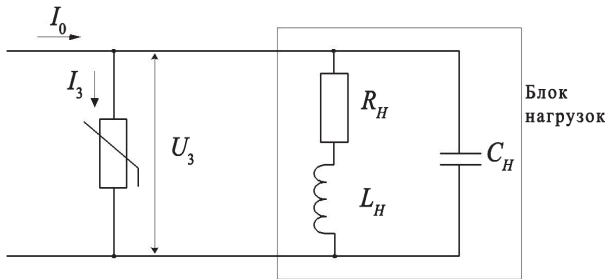


Рис. 3. Условная схема подключения УЗИП [8]

Нелинейное сопротивление УЗИП моделируется эквивалентным линейным сопротивлением и источником э.д.с. E_0 . При практических расчетах целесообразно использовать не статическое, а динамическое сопротивление $R_{дн}$ нелинейного элемента, под которым понимается отношение бесконечно малого приращения напряжения dU к соответствующему приращению тока dI .

Такая замена позволяет считать схему линейной, а для описания процессов использовать алгебраические уравнения:

$$U = E_0 + IR_{дн}, \quad I = \frac{U}{R_{дн}} + I_0,$$

$$I_0 = -\frac{E_0}{R_{дн}}.$$

Тогда уравнение системы (1) примет следующий вид:

$$U_3(t) = E_0 + I_3 R_{дн}. \quad (2)$$

При подстановке уравнения (2) в систему (1), обобщенные граничные условия, отображающие математическую модель УЗИП и позволяющие рассчитывать электромагнитные процессы, как с учетом статического, так и динамического сопротивления, представляются системой уравнений:

$$\begin{cases} I_C(t) = C_H \frac{dU(t)}{dt} \\ U_3(t) = I_R(t) \cdot R_H + L_H \frac{dI_R(t)}{dt} \\ U_3(t) = E_0 + R_{дн} \cdot I_3(t) \\ I_{\Sigma}(t) = I_C(t) + I_R(t) + I_3(t) + K_{ж}. \end{cases}$$

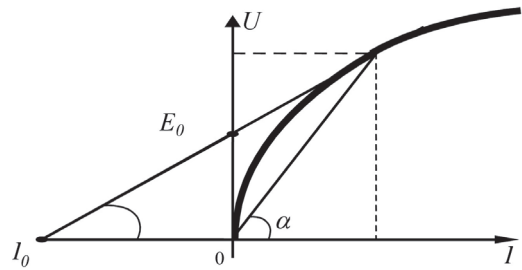


Рис. 4. Вольтамперная характеристика нелинейного элемента УЗИП

Применение метода конечных разностей

Система уравнений (1) решается методами конечных разностей.

Дискретизация уравнений электродинамики с помощью метода конечных разностей включает разбиение временной и пространственной области на мелкие шаги. Это позволяет перейти от непрерывных уравнений к системе алгебраических уравнений, которые могут быть решены численно.

Система (1) позволяет определить реакции кабелей на воздействия электрических полей ЭМИ ГР в виде:

- токов в жилах и экранах кабелей;
- напряжений в цепях «жила — экран» и «экран — земля»;
- токов и напряжений ограничений (остающихся напряжений на УЗИП);
- токов и напряжений, затекающих на оборудование СЭС.

Расчетная оценка влияния токов и напряжений, наводимых грозовыми разрядами на СЭС

Для проведения расчетов напряжений и токов, наводимых ГР в КЛ СЭС, рассмотрим реально существующую схему электроснабжения особо важного потребителя (ОВП) от ТП-6,3/0,4 кВ.

Условная расчетная схема размещения структурных элементов СЭС, подверженных воздействию токов ГР, приведена на рис. 5.

Под ОВП понимается устройство распределительное (УР), КЛ которого защищены УЗИП (в данном случае «Джоуль-28»), и ответственные потребители П1, П2, П3.

В качестве вариантов воздействия рассмотрим прямые удары молнии по объектам энергосистемы (рис. 5).

Результаты расчетов амплитудно-временных параметров напряжений и токов, наводимых ГР, приводятся в табл. 1 и 2. В числителе — графа 3 и 4 табл. 1 и 2 приводятся максимальные значения и временные характеристики напряжений, наведенных в КЛ, без учета защитного действия УЗИП. В знаменателе — графа 3 и 4 табл. 1 и 2 приводятся максимальные значения и временные характеристики напряжений, наведенных в КЛ, с учетом защитного действия УЗИП.

Табл. 2 показывает амплитудно-временные параметры токов и напряжений, наводимых при прямых ударах молнии.

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что максимальные уровни напряжений и токов в КЛ наблюдаются при прямых ударах молнии в ТП. Максимальные уровни напряжений и токов могут достигать значений до 13300 В и 870 А при длительностях импульсов до 350 – 900 мкс.

Уровни напряжений, наведенных ГР, приводят к срабатыванию УЗИП, установленных на вводах КЛ ВББШВ-(0) 5×120 в УР ОВП.

УЗИП ограничивают амплитуды наведенных молнией напряжений до уровней 1440–1560 В, что наглядно демонстрируется на рис. 6, а.

Таким образом, применение УЗИП необходимо для обеспечения надежного и бесперебойного электроснабжения ОВП [10].

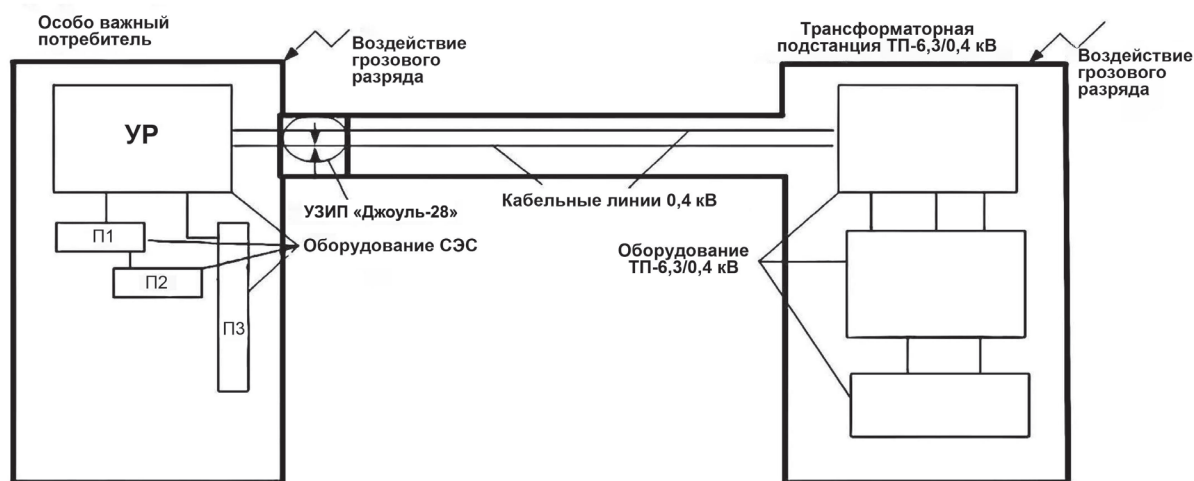


Рис. 5. Условная расчетная схема размещения структурных элементов СЭС, подверженных воздействию токов ГР

Таблица 1

**Амплитудно-временные параметры токов и напряжений,
наводимых в КЛ при прямых ударах молнии в ТП**

Откуда	Куда	Амплитуда напряжения между жилами и экранами, В	Время достижения максимума / длительность до полуспада импульса напряжения, с	Амплитуда тока в жилах, А	Время достижения максимума / длительность до полуспада импульса тока, с
ТП	УР	$\frac{13300,0}{1480,0}$	$\frac{5,0 \cdot 10^{-5}/1,5 \cdot 10^{-4}}{7,0 \cdot 10^{-5}/3,0 \cdot 10^{-4}}$	870,0	$7,0 \cdot 10^{-5}/3,0 \cdot 10^{-4}$
УР	П1	$\frac{13400,0}{1520,0}$	$\frac{5,0 \cdot 10^{-5}/1,5 \cdot 10^{-4}}{8,0 \cdot 10^{-5}/3,5 \cdot 10^{-4}}$	38,5	$3,2 \cdot 10^{-4}/6,0 \cdot 10^{-4}$
УР	П2	$\frac{13600,0}{1560,0}$	$\frac{5,0 \cdot 10^{-5}/1,7 \cdot 10^{-4}}{8,0 \cdot 10^{-5}/2,5 \cdot 10^{-4}}$	59,5	$3,6 \cdot 10^{-4}/8,0 \cdot 10^{-4}$
УР	П3	$\frac{13300,0}{1510,0}$	$\frac{5,0 \cdot 10^{-5}/1,5 \cdot 10^{-4}}{7,0 \cdot 10^{-5}/3,5 \cdot 10^{-4}}$	38,4	$3,2 \cdot 10^{-4}/6,0 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Амплитудно-временные параметры токов и напряжений, наводимых в КЛ при прямых ударах молнии непосредственно по потребителю

Откуда	Куда	Амплитуда напряжения между жилами и экранами, В	Время достижения максимума / длительность до полуспада импульса напряжения, с	Амплитуда тока в жилах, А	Время достижения максимума / длительность до полуспада импульса тока, с
ТП	УР	$\frac{7360,0}{1510,0}$	$\frac{6,0 \cdot 10^{-5}/2,0 \cdot 10^{-4}}{1,5 \cdot 10^{-5}/5,5 \cdot 10^{-4}}$	865,0	$9,0 \cdot 10^{-5}/6,0 \cdot 10^{-4}$
УР	П1	$\frac{7270,0}{1440,0}$	$\frac{6,0 \cdot 10^{-5}/2,1 \cdot 10^{-4}}{1,1 \cdot 10^{-4}/5,5 \cdot 10^{-4}}$	29,0	$8,0 \cdot 10^{-5}/2,0 \cdot 10^{-4}$
УР	П2	$\frac{7350,0}{1420,0}$	$\frac{6,0 \cdot 10^{-5}/2,0 \cdot 10^{-4}}{1,3 \cdot 10^{-4}/5,5 \cdot 10^{-4}}$	43,3	$1,1 \cdot 10^{-4}/3,0 \cdot 10^{-4}$
УР	П3	$\frac{7300,0}{1450,0}$	$\frac{6,0 \cdot 10^{-5}/2,1 \cdot 10^{-4}}{9,0 \cdot 10^{-5}/5,5 \cdot 10^{-4}}$	23,2	$7,0 \cdot 10^{-5}/1,4 \cdot 10^{-4}$

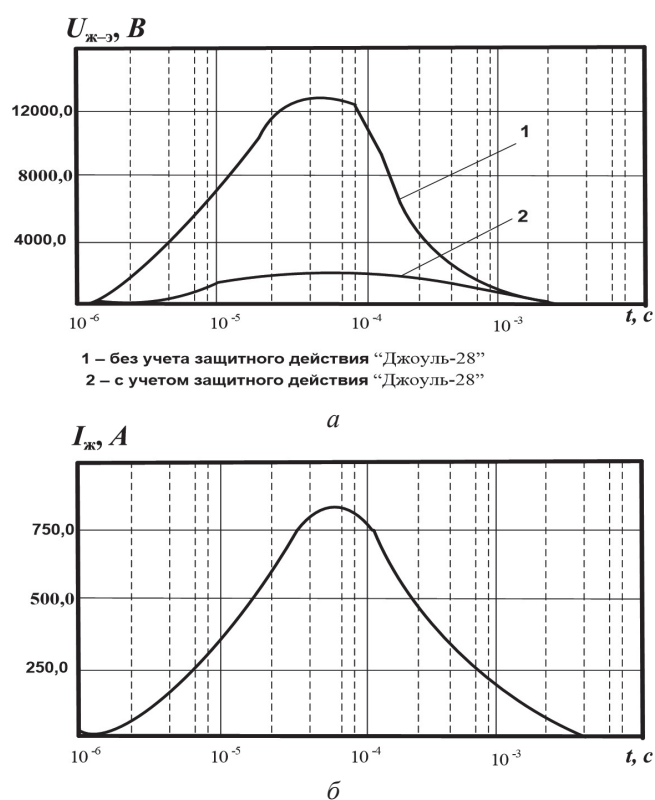


Рис. 6. Амплитудно-временные зависимости напряжений между жилами и экранами $U_{ж-э}$ (а) и токов в жилах $I_{ж}$ (б) КЛ ВБбШв-(0) 5×120

Кроме этого, использование УЗИП не только сокращает риск повреждения электрооборудования СЭС и простоев в электросети, но и обеспечивает надежную защиту от импульсных перенапряжений, существенно снижая амплитуды и временные характеристики напряжений и токов, обусловленных ГР.

Заключение

В результате проведенного исследования было установлено, что ГР представляют серьезную угрозу для электрических систем, вызывая значительные наводимые токи и напряжения, которые могут привести к сбоям в работе,

повреждениям оборудования и полной остановке электроснабжения. Поэтому совершенствование методик анализа параметров ЭМИ, вызванных ГР, и их воздействия на СЭС является в настоящее время одной из актуальных задач при проектировании технических систем с повышенными требованиями к бесперебойности энергообеспечения.

Разработанная методика расчета наведенных токов и напряжений позволяет с требуемой точностью оценить критически важные параметры защищенности электрооборудования и инфраструктуры. Это особенно актуально для критически важных объектов, где сбои в электроснабжении недопустимы. Использование методов моделирования и численного анализа обеспечивает высокую точность расчетов и надежность результатов, что позволяет своевременно принимать меры по защите оборудования и минимизировать риски, связанные с воздействиями ЭМИ.

УЗИП являются ключевым элементом защиты электрооборудования от импульсных перенапряжений, вызванных ГР. Без применения УЗИП оборудование остается уязвимым к этому воздействию, что может привести к сбоям в работе, повреждениям оборудования и полной остановке электроснабжения. Применение УЗИП позволяет минимизировать риски, обеспечивая стабильное и бесперебойное электроснабжение. Кроме того, УЗИП помогает снизить эксплуатационные расходы, предотвращая повреждения и продлевая срок службы оборудования.

Применение предложенной методики обеспечивает эффективную защиту электрооборудования, минимизируя риски и затраты, связанные с воздействием ГР, за счет применения УЗИП. Разработанная методика и рекомендации имеют, несомненно, практическое значение и могут быть использованы для улучшения существующих стандартов и нормативов в области электромагнитной совместимости и защиты электрооборудования.

Список источников

1. Тереньтев Д.Е., Сторожук Н.Л. Защита оборудования и объектов связи от опасных электромагнитных влияний // Информация и космос. 2004. № 3. С. 38–45.
2. Качиев Л.Н., Балюк Н.В., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 200 с.
3. Daniel L. Stein Electromagnetic pulse — the uncertain certainty // Bulletin of the Atomic Scientist. 1983. V. 39. No 3. Pp. 52–56.
4. Kalma A.H., Fischer C.J. Electrical Pulse Burnout Testing Vol. of Light — Emitting Diodes // IEEE Trans. Dec. 1975. V. NS-22, No 6. Pp. 2510–2515.
5. Павлова Э.И., Гизатуллин З.М. Методика анализа помех в электронных средствах при электромагнитном воздействии разряда молнии // «Перспективные информационные технологии» ПИТ, 2019. 621 с.
6. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988. 255 с.
7. Вэнс Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели. М.: Радио и связь, 1982. 120 с.
8. Технические условия на изделие «Джоуль-28». ЕАИГ.674361.004. ТУ. М.: ВЭИ им. В.И. Ленина, 1989. 20 с.
9. Хромов В.В., Фоминич Э.Н., Курьяков Е.В. Оперативная оценка токов и напряжений в устройствах защиты технических средств при воздействии электромагнитных импульсов // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. 2020. С. 464–467.
10. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. М.: Связь, 1979. 264 с.