

ЗАЩИЩЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ВВОДАМ ПИТАНИЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ ПРИ УДАРАХ МОЛНИИ

СОЛОВЬЁВ Александр Дмитриевич, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: Shura.Solovyov.01@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

В статье рассматривается задача защиты вводов питания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от грозовых перенапряжений, распространяющихся по воздушным линиям автоблокировки 10 кВ. Показано, что при прямых и повторных ударах молнии вводной ограничитель перенапряжений, установленный непосредственно у защищаемого объекта, может испытывать недопустимую токовую и энергетическую нагрузку, что снижает устойчивость системы защиты. Для исследования указанных процессов разработана объединенная математическая модель системы «воздушная линия — ввод питания — средства защиты», включающая трехфазную распределенную модель линии, источник грозового воздействия на основе функции Хайдлера, модель ввода питания релейного шкафа, частотно-зависимую модель заземляющего устройства и нелинейные модели ограничителя перенапряжений и мультикамерных разрядников. Численная реализация модели выполнена в среде MATLAB. Проведены вычислительные эксперименты для одиночных и серийных ударов молнии при различных конфигурациях защищенных подходов и схемах размещения защитных аппаратов на линии. Установлено, что равномерная установка ограничителей перенапряжений по длине линии не обеспечивает требуемой устойчивости при энергоемких импульсах типа 10/350 мкс вследствие превышения допустимой энергонагрузки аппаратов. Показано, что применение мультикамерных разрядников позволяет существенно снизить напряжение на вводе питания и нагрузку на вводной ограничитель перенапряжений. Полученные результаты подтверждают перспективность пространственно-организованных схем защиты, обеспечивающих поэтапное ограничение грозовой волны и перераспределение импульсной энергии между несколькими аппаратами при одиночных и серийных ударах молнии.

Ключевые слова: удар молнии, математическая модель, защищенные подходы, импульсные перенапряжения, железнодорожная автоматика и телемеханика

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-114-127

▼ Введение

Надежность функционирования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) во многом определяется устойчивостью их систем электроснабжения к внешним электромагнитным воздействиям, среди которых особое место занимают грозовые перенапряжения. Для значительной части объектов ЖАТ питание осуществляется от воздушных линий автоблокировки (ВЛ АБ) напряжением 10 кВ, по которым при ударах молнии распространяются импульсные электромагнитные волны, способные достигать вводов питания релейных шкафов и вызывать опасные перенапряжения в высоковольтных и вторичных цепях. В этих условиях ввод питания становится одним из наиболее ответственных узлов, через который

внешнее грозовое воздействие преобразуется во внутреннюю электромагнитную нагрузку на элементы защищаемой аппаратуры.

Ранее выполненные исследования [1] позволили установить высокую значимость грозовых воздействий в структуре отказов устройств ЖАТ, а также показать определяющую роль вводов питания как канала проникновения опасных импульсных воздействий в аппаратуру. В работе [2] также были рассмотрены волновые процессы в ВЛ АБ 10 кВ при воздействии молнии, обоснована необходимость использования трехфазной модели линии с распределенными параметрами и показано влияние места установки ограничителей перенапряжений на характер переходных процессов. Вместе с тем данные результаты не решают в полном объеме

задачу рационального построения защиты самого ввода питания, поскольку не отвечают на вопрос о том, каким образом должна быть организована система средств защиты на подходе к защищаемому объекту.

Традиционная схема грозозащиты, основанная на установке ограничителя перенапряжений непосредственно на вводе питания, в ряде случаев оказывается недостаточной [3]. При распространении грозового импульса по линии вводной ограничитель воспринимает на себя основную токовую и энергетическую нагрузку, величина которой определяется не только параметрами самого импульса, но и волновыми процессами в линии, отражениями, несогласованием импедансов, динамикой потенциала заземления и взаимодействием с другими элементами схемы [4]. Особенно жесткие режимы возникают при серийных ударах молнии, когда повторное поступление импульсной энергии может приводить к перегрузке вводного средства защиты даже при наличии отдельных средств защиты, размещенных вдоль линии [5].

В связи с этим представляет интерес переход от локального принципа защиты к принципу формирования защищенного подхода к вводу питания. Под защищенным подходом в данной работе понимается локализованный участок линии, примыкающий к защищаемому объекту и оснащенный пространственно-согласованной системой средств защиты, обеспечивающей поэтапное ограничение грозовой волны до ее поступления на ввод питания. Такой подход позволяет рассматривать задачу защиты не как выбор отдельного средства защиты, а как задачу координации нескольких средств защиты, совместно работающих в единой электромагнитной системе «линия — подход — ввод питания».

Цель работы состоит в расчетном обосновании конфигурации защищенного подхода к вводу питания устройств ЖАТ, обеспечивающей снижение остаточного напряжения и энергетической нагрузки на вводное средство защиты при грозовых воздействиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать объединенную математическую модель системы «ВЛ АБ 10 кВ — ввод

питания релейного шкафа — заземляющее устройство — средства защиты», предназначенную для исследования волновых процессов и энергетической нагрузки защитных аппаратов при грозовых воздействиях;

- выполнить численное исследование защищенных подходов при одиночных ударах молнии, включая анализ вариантов размещения средств защиты на линии, расчет максимальных напряжений на вводе питания и защищаемых устройствах ЖАТ, а также оценку энергетической нагрузки средств защиты;
- исследовать работу защитных схем при серийных ударах молнии и обосновать конфигурацию защищенного подхода, обеспечивающую поэтапное ограничение грозовой волны, снижение нагрузки на вводной ОПН и сохранение работоспособности средств защиты.

В работе используется математическое моделирование во временной области, позволяющее рассматривать ВЛ АБ, ввод питания, заземляющее устройство и средства защиты в составе единой динамической системы. Это дает возможность исследовать влияние структуры защищенного подхода на токовую и энергетическую нагрузку вводного средства защиты при одиночных и серийных ударах молнии.

Математическая модель ввода питания устройств ЖАТ

Для исследования защищенных подходов к вводам питания устройств ЖАТ используется объединенная математическая модель, в которой ВЛ АБ 10 кВ, грозовое воздействие, ввод питания релейного шкафа (РШ), система заземления и средства защиты рассматриваются как единая динамическая система. Такая постановка позволяет проследить распространение импульсного воздействия от точки удара молнии до ввода питания, а также определить перераспределение токов и энергии между ВЛ АБ, трансформатором, паразитными емкостями, средствами защиты и локальным заземлением.

Импульсные процессы в трехфазной ВЛ АБ описываются многопроводными телеграфными уравнениями [6], которые в матричной форме имеют вид:

$$\frac{du(x,t)}{dx} = -L \frac{di(x,t)}{dt} - Ri(x,t), \quad (1)$$

$$\frac{di(x,t)}{dx} = -C \frac{du(x,t)}{dt} - Gu(x,t), \quad (2)$$

где $u(x, t)$ и $i(x, t)$ — векторы фазных напряжений и токов соответственно;

R, L, G, C — матрицы продольных и поперечных распределенных параметров линии.

В такой постановке каждая фаза рассматривается не изолированно, а во взаимосвязи с двумя другими фазами, что особенно важно при грозовых воздействиях, когда межфазные индуктивные и емкостные связи заметно влияют на перераспределение энергии импульса.

Использование телеграфных уравнений позволяет описывать не только локальные токи и напряжения, но и распространение, отражение и переотражение бегущих волн вдоль линии [7]. Для задачи защиты ввода питания это принципиально, поскольку режим работы вводного средства защиты и средств защиты, установленных на подходе, определяется не одним только параметром источника молнии, а всей структурой волнового процесса в линии.

Для численной реализации непрерывная по длине линия заменяется каскадом π -звеньев [8] длиной Δx , параметры которых определяются соотношениями:

$$R_\pi = R\Delta x, \quad L_\pi = L\Delta x, \quad G_\pi = G\Delta x, \quad C_\pi = C\Delta x.$$

Такой переход от распределенной системы к цепной π -модели позволяет сохранить физический смысл параметров линии и одновременно получить конечномерную систему уравнений, пригодную для численного интегрирования во временной области.

После дискретизации модель ВЛ АБ приводится к форме переменных состояния:

$$M_l \dot{x}_l = A_l x_l + B_l f_l(t), \quad (3)$$

где x_l — вектор состояний линии, включающий токи продольных индуктивных ветвей и напряжения на емкостных узлах π -модели; f_l — вектор внешних воздействий.

Такая форма записи удобна тем, что позволяет включить ВЛ АБ в общую нелинейную систему уравнений совместно с моделью ввода питания, средствами защиты и заземлением.

Внешнее возбуждение в расчетной схеме задается аналитической функцией Хайдлера, широко применяемой при моделировании токов молнии [9]. Временная зависимость импульса записывается в виде:

$$i_M(t) = I_p \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (4)$$

где $i_M(t)$ — ток молнии, А;

I_p — амплитуда тока, А;

τ_1 — параметр фронта, с;

τ_2 — параметра хвоста, с;

n — показатель крутизны фронта;

$t \geq 0$ — время от момента начала разряда, с.

Для описания серийных ударов молнии суммарное воздействие представляется суперпозицией отдельных импульсов:

$$i_M^{(\Sigma)}(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{уд}}} i_{M,k}(t - t_k), \quad (5)$$

где $N_{\text{уд}}$ — число ударов в серии;

t_k — момент начала k -го удара, с;

$i_{M,k}$ — ток k -го удара по форме (4).

Введение такой зависимости принципиально важно, поскольку при серийных ударах определяющим становится уже не только максимальное мгновенное значение тока, но и накопление энергии в защитных аппаратах, прежде всего во вводном средстве защиты.

Источник тока молнии включается в общую расчетную схему через распределенную модель линии. Тем самым параметры импульса определяют не только локальное возбуждение в точке удара, но и весь последующий волновой процесс, формирующий нагрузку на средства защиты, защищенного подхода и на ввод питания релейного шкафа.

Ввод питания в РШ рассматривается как сосредоточенная нелинейная подсистема, присоединенная к конечному узлу ВЛ АБ. В ее состав входят первичная цепь трансформатора, магнитная ветвь с учетом нелинейности намагничивания, паразитные емкости, вводной кабель, защитное устройство и локальная система заземления. Такая структура модели позволяет учитывать основные каналы передачи импульсной энергии во внутренние цепи

релейного шкафа: проводящий, магнитный и емкостный.

Для первичной цепи трансформатора уравнение принимается в виде:

$$L_{Q1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + u_p - u_g = u_m(t), \quad (6)$$

где i_1 — ток первичной обмотки;

L_{Q1} и R_1 — индуктивность рассеяния и активное сопротивление первичной цепи;

u_p — потенциал первичного узла;

u_g — потенциал локальной земли;

u_m — напряжение на конце ВЛ АБ.

Нелинейность намагничивания трансформатора учитывается через дифференциальную индуктивность магнитной ветви:

$$u_m = L_d(i_m) \frac{di_m}{dt}, \quad (7)$$

где i_m — ток намагничивания;

$L_d(i_m)$ — дифференциальная индуктивность, зависящая от текущего значения магнитного тока.

Введение зависимости $L_d(i_m)$ позволяет отказать от квазилинейного описания трансформатора и учесть изменение его магнитного состояния при импульсных воздействиях, что важно для корректной оценки магнитного канала передачи перенапряжения.

Паразитные емкостные связи описываются токами смещения:

$$i_{pg}(t) = C_{pg} \frac{du_p(t)}{dt}, \quad i_{sg}(t) = C_{sg} \frac{du_s(t)}{dt},$$

$$i_{ps}(t) = C_{ps} \frac{d(u_p(t) - u_s(t))}{dt},$$

где u_s — потенциал вторичной стороны;

C_{pg} — емкость первичной обмотки относительно земли;

C_{ps} — межобмоточная емкость;

C_{sg} — эквивалентная емкость вторичной цепи относительно земли.

Данные соотношения отражают емкостный канал проникновения грозового воздействия, который особенно заметен на крутых фронтах импульса и потому должен учитываться совместно с магнитной и проводящей передачей.

Вводной кабель моделируется π -схемой с продольными параметрами R_k, L_k и попереч-

ными параметрами C_k, G_k . Для продольной ветви записывается:

$$L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k = u_{k,in} - u_{k,out}, \quad (8)$$

а для входного и выходного узлов кабеля:

$$C_k \frac{du_{k,in}}{dt} = i_{in} - \frac{1}{2} G_k u_{k,in} - i_k, \quad (9)$$

$$C_k \frac{du_{k,out}}{dt} = i_k - \frac{1}{2} G_k u_{k,out} - i_{load}. \quad (10)$$

В этой постановке кабельный участок рассматривается не как пассивное соединение, а как самостоятельное звено преобразования импульсного воздействия: продольные параметры определяют форму тока и падение напряжения, а поперечные — перераспределение зарядов между узлами схемы.

В результате модель ввода питания приводится к форме переменных состояния:

$$M_{in} \dot{x}_m = A_{in} x_m + b_m(t) + \varphi_{in}(x_m, t), \quad (11)$$

где x_m содержит токи индуктивных элементов, напряжения на емкостях и внутренние переменные заземляющей подсистемы, а φ_{in} включает нелинейности магнитной ветви и защитных устройств.

Такое представление получено на основе модифицированного узлового метода и обеспечивает энергетически согласованное сопряжение ввода питания с моделью линии.

При импульсных воздействиях система заземления не может рассматриваться как идеальный нулевой потенциал [10]. Протекание тока через заземляющее устройство вызывает динамическое смещение потенциала локальной земли, что влияет на синфазную составляющую перенапряжений и, следовательно, на фактическое напряжение на защищаемой нагрузке и режим работы средств защиты [11].

Для описания частотно-зависимого импеданса заземляющего устройства используется Foster-аппроксимация [12]:

$$Z_g(s) = \sum_{k=1}^m \frac{R_k}{1 + sR_k C_k}. \quad (12)$$

Такая форма позволяет учесть как начальную емкостную стадию процесса, связанную

с зарядкой окружающего объема грунта, так и последующий режим, в котором возрастает роль активного сопротивления растекания.

Во временной области каждая ветвь Foster-модели описывается уравнением:

$$\frac{du_{gk}}{dt} = -\frac{1}{R_k C_k} u_{gk} + \frac{1}{C_k} i_g, \quad (13)$$

где u_{gk} — напряжение на k -й ветви;

i_g — ток, поступающий в систему заземления.

Потенциал локального узла земли определяется суммой напряжений на всех ветвях [13]:

$$u_g = \sum_{k=1}^m u_{gk}. \quad (14)$$

Введение переменной u_g позволяет учитывать смещение потенциала локальной земли во времени и тем самым корректно описывать синфазную составляющую перенапряжения.

С учетом динамики заземления фактическое напряжение на защищаемой нагрузке определяется выражением:

$$u_{load} = u_{prot} + u_g, \quad (15)$$

где u_{prot} — остаточное напряжение на защитном устройстве.

Из соотношения (15) следует, что даже при исправной работе ограничителя повышение потенциала локальной земли может привести к росту напряжения относительно удаленной земли.

В качестве средства защиты будет моделироваться ограничитель перенапряжения нелинейный (ОПН). Вводной ОПН моделируется как нелинейный двухполюсник, подключенный между фазным узлом и локальной землей [14]. Напряжение на ОПН определяется выражением:

$$u_{опн} = u_\phi - u_g, \quad (16)$$

где u_ϕ — потенциал фазного узла.

Такая запись подчеркивает, что рабочий режим ограничителя определяется не абсолютным уровнем фазного напряжения, а разностью потенциалов между фазой и динамическим узлом локальной земли.

Ток через ОПН аппроксимируется степенной вольт-амперной характеристикой [15]:

$$i_{var}(t) = k_{опн} |u_{опн}(t)|^{a_{опн}} \text{sign}(u_{опн}(t)), \quad (17)$$

где $k_{опн}$ — коэффициент масштабирования вольт-амперной характеристики;

$i_{var}(t)$ — ток варисторного элемента;

$a_{опн}$ — показатель нелинейности.

Это позволяет анализировать не только уровень ограничения напряжения, но и перераспределение тока и энергии в схеме.

Для оценки энергетической нагрузки вводится переменная накопленной энергии:

$$\dot{W}_{опн} = u_{опн} i_{опн}, \quad (18)$$

$$W_{опн}(t) = \int_0^t u_{опн}(\tau) i_{опн}(\tau) d\tau. \quad (19)$$

Именно энергия, рассеиваемая во вводном ОПН, в настоящей статье рассматривается как один из основных критериев эффективности защищенного подхода, поскольку при тяжелых воздействиях предельное состояние аппарата определяется не только мгновенным током, но и суммарной поглощенной энергией. Критерий разрушения ОПН принимается в виде:

$$W_{опн}(t) \geq W_{lim}, \quad (20)$$

где W_{lim} — предельно допустимая энергия.

После достижения этого уровня в модели полагается:

$$i_{опн} = 0, \quad W_{опн}(t) \geq W_{lim},$$

что соответствует переходу средства защиты в режим разрушения. Для защитного устройства, установленного на выходе вводного кабеля, используются аналогичные соотношения:

$$u_{prot} = u_{k,out} - u_g, \quad (21)$$

$$i_{prot} = f(u_{prot}), \quad (22)$$

где функция f определяется типом применяемого устройства. Такое представление удобно тем, что позволяет включать в общую систему различные варианты защитных элементов без изменения общей структуры модели.

Кроме ОПН, в качестве средства защиты в дальнейших экспериментах будут использоваться мультикамерные разрядники (МКР).

МКР рассматривается как дуговое средство защиты [16], подключенное в узел «фаза — земля». Его влияние на режим системы определяется динамикой дуговых проводимостей и логикой переходов между режимами

«изоляция — дуга — восстановление». В компактной форме эквивалентное напряжение МКР можно записать как:

$$u_{\text{МКР}} = i_{\text{МКР}} \sum_{j=1}^{N_C} \frac{1}{g_j + \varepsilon}, \quad (23)$$

где g_j — проводимость j -й камеры;
 ε — параметр регуляризации;
 N_C — число камер.

Динамика проводимостей задается системой уравнений:

$$\frac{dg_j}{dt} = F_j(g_j, u_j, i_j). \quad (24)$$

Именно такая модель позволяет исследовать перераспределение тока между дугowymi и варисторными средствами защиты и, следовательно, оценивать разгрузку вводного ОПН в составе защищенного подхода.

После построения моделей отдельных подсистем формируется объединенная динамическая модель системы «ВЛ АБ — ввод питания — средства защиты». Вектор состояния имеет блочную структуру

$$x = \begin{bmatrix} x_l \\ x_{in} \\ x_g \\ x_{prot} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где x_l — состояния ВЛ АБ;
 x_{in} — состояния ввода питания;
 x_g — состояния заземляющей подсистемы;
 x_{prot} — внутренние переменные защитных устройств.

Итоговая система записывается в виде

$$M\dot{x} = Ax + b(t) + \varphi(x, t), \quad (26)$$

где M — матрица масс;
 A — линейная часть модели;
 $b(t)$ — внешнее возбуждение со стороны тока молнии;
 $\varphi(x, t)$ — нелинейные составляющие, связанные с характеристиками трансформатора, ОПН и МКР.

Сопряжение распределенной модели линии и сосредоточенной модели ввода питания выполняется по конечному узлу ВЛ АБ: напряжение в конце линии непосредственно прикладывается к вводу питания, а ток

в точке сопряжения определяется балансом токов между магнитной ветвью трансформатора, паразитными емкостями, защитными устройствами и системой заземления. Такое объединение обеспечивает энергетическую согласованность модели и позволяет проследить распространение грозового импульса от места удара молнии до оборудования РШ без разрыва между распределенной и сосредоточенными частями схемы. Именно эта объединенная система далее используется для численного исследования эффективности защищенных подходов при одиночных и серийных ударах молнии.

На основе представленной математической модели разработана программа в среде MATLAB, реализующая численное исследование системы «ВЛ АБ — ввод питания — средства защиты» во временной области. Для интегрирования объединенной системы уравнений используется решатель ode15s, выбор которого обусловлен жесткостью задачи [17], связанной с совместным учетом распределенной модели линии, нелинейных защитных устройств, паразитных связей и динамики заземляющего устройства. Программа позволяет варьировать параметры ВЛ АБ, грозового воздействия и конфигурации средств защиты, обеспечивая проведение вычислительных экспериментов для различных вариантов защищенного подхода при одиночных и серийных ударах молнии.

Результаты исследования защищенных подходов при одиночных ударах молнии

Численное исследование при одиночных ударах молнии выполнялось для трехфазной ВЛ АБ 10 кВ длиной 2000 м с дискретизацией на 100 μ -звеньев. В качестве воздействий рассматривались импульсы тока молнии с амплитудой 100 кА и временными характеристиками 1,2/50¹ мкс, 8/20 мкс и 10/350² мкс. Такой набор импульсов позволяет сопоставить

¹ IEC 60060-1. High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010. 139 p.

² IEC 62305-1. Protection against lightning. Part 1: General principles. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010. 82 p.

режимы, различающиеся как по крутизне фронта, так и по энергоемкости, и тем самым оценить работу средств защиты в различных расчетных условиях.

Указанные формы импульсов соответствуют различным сценариям грозового воздействия: от стандартного испытательного импульса до энергоемкого воздействия, моделирующего прямой удар молнии. Для каждого варианта схемы определялись:

- энергия, выделяемая в каждом защитном аппарате;
- напряжение на вводе питания трансформатора;

- напряжение на защищаемых вторичных устройствах;
- факт разрушения средств защиты.

На рис. 1 показана расстановка ОПН по линии для защиты ввода питания в РЩ.

В табл. 1 приведены результаты численного моделирования электромагнитных процессов в линии при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА с временной характеристикой 1,2/50 мкс. Расчеты выполнены для различных вариантов равномерной установки ОПН по длине линии. В таблице представлены значения энергии, выделяемой на каждом средстве защиты, максимальные напряжения на вводе

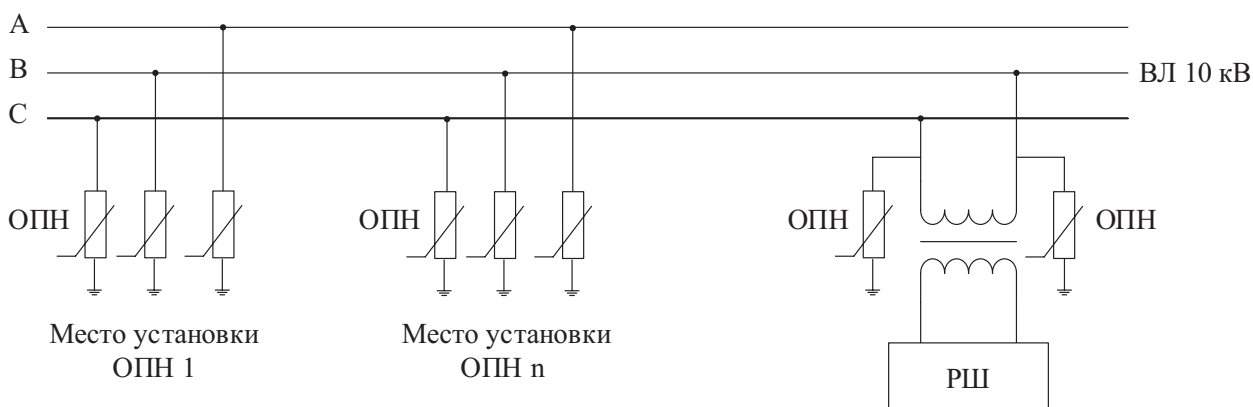


Рис. 1. Расстановка ОПН по линии для защиты ввода питания в РЩ

ТАБЛИЦА 1. Результаты численного моделирования при ударе молнии импульсом 1,2/50 с использованием ОПН

Амплитуда волны, кА	Хар-ка имп. Мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж					Напряжение на вводе питания, кВ	Напряжение на устройствах, кВ	
			Место установки разрядников по линии, м							
			0	400	800	120	1600			Вводное
100	1,2/50	-							542,4	45
		-						Разр.	127,2	18
		1 по лин.	Разр.					Разр.	70,8	11,6
		1 по лин.			Разр.			Разр.	74,6	11,8
		1 по лин.					Разр.	Разр.	78,3	12
		2 по лин.	Разр.				Разр.	2,8	64,1	10,8
		2 по лин.	Разр.		Разр.			2,8	62,5	10,5
		2 по лин.			Разр.		Разр.	2,8	66,7	11
		3 по лин.	Разр.		Разр.		2,8	1,6.	58,9	10
		5 по лин.	Разр.	Разр.	Разр.	3,1	2,4	1,2	49,8	9,8

питания в РШ, а также напряжения на подключенных устройствах ЖАТ.

Анализ результатов показывает, что установка одного ОПН снижает напряжение на вводе до порядка 70–80 кВ, однако сопровождается разрушением аппарата вследствие превышения допустимой энергонагрузки. При увеличении числа ОПН до трех — пяти наблюдается дальнейшее снижение остаточного напряжения до 49–60 кВ, а напряжение на защищаемых устройствах уменьшается до 9–12 кВ. Снижение амплитуды по сравнению с незащищенным режимом превышает 85–90 %.

При этом распределение энергии остается неравномерным: первые по линии ОПН воспринимают наибольшую нагрузку и разрушаются. Таким образом, для импульса 1,2/50 достигается эффективное ограничение напряжения, однако устойчивость защитной системы ограничена из-за перегрузки средств защиты.

В табл. 2 представлены результаты моделирования при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА с характеристикой 8/20 мкс для тех же вариантов равномерной установки ОПН. В таблице приведены значения энергии, выделяемой в аппаратах, а также максимальные напряжения на вводе питания и на под-

ключаемых устройствах. Это позволяет сопоставить эффективность защиты при импульсе иной временной формы и оценить влияние длительности токовой составляющей на энергонагрузку.

Согласно полученным данным, при установке 3–5 ОПН напряжение на вводе снижается до 37–56 кВ, а на защищаемых устройствах — до 8,6–10,4 кВ. По сравнению с исходным уровнем напряжения снижение достигает 85–90 %. Разрушение средства защиты фиксируется преимущественно при малом их количестве.

По сравнению с импульсом 1,2/50 наблюдается более устойчивый режим работы системы. Это объясняется меньшей интегральной энергией импульса 8/20 и более короткой длительностью токовой составляющей, что снижает тепловую нагрузку на варисторные элементы [18].

В табл. 3 приведены результаты моделирования при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА с характеристикой 10/350 мкс. Данный импульс характеризуется значительно большей длительностью и интегральной энергией и используется для оценки устойчивости защитной схемы при энергоемком воздействии [19].

ТАБЛИЦА 2. Результаты численного моделирования при ударе молнии импульсом 8/20 с использованием ОПН

Амплитуда волны, кА	Хар-ка имп. Мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж						Напряжение на вводе питания, кВ	Напряжение на устройствах, кВ
			Место установки разрядников по линии, м							
			0	400	800	1200	1600	Вводное		
100	8/20	–							542,4	45
		–						Разр.	117,1	17,6
		1 по лин.	Разр.					Разр.	60,3	10,3
		1 по лин.			Разр.			Разр.	64,5	10,5
		1 по лин.					Разр.	Разр.	68,2	11,4
		2 по лин.	Разр.				Разр.	2,4	54,8	10,3
		2 по лин.	Разр.		Разр.			2,3	52,3	10,2
		2 по лин.			Разр.		Разр.	2,5	56,1	10,4
		3 по лин.	Разр.		Разр.		2,8	1,6	45,9	9,4
		5 по лин.	Разр.	Разр.	3,2	2,7	2,4	1,2	37,1	8,6

ТАБЛИЦА 3. Результаты численного моделирования при ударе молнии импульсом 10/350 с использованием ОПН

Амплиту- да волны, кА	Хар-ка имп. Мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж					Напря- жение на вводе пи- тания, кВ	Напря- жение на устрой- ствах, кВ	
			Место установки разрядников по линии, м							
			0	400	800	1200	1600			Вводное
100	10/350	–							562,3	45
		–						Разр.	217,1	27,6
		1 по лин.	Разр.					Разр.	160,3	20,3
		1 по лин.			Разр.			Разр.	164,5	20,5
		1 по лин.					Разр.	Разр.	168,2	21,4
		2 по лин.	Разр.				Разр.	Разр.	154,8	19,3
		2 по лин.	Разр.		Разр.			Разр.	152,3	19,2
		2 по лин.			Разр.		Разр.	Разр.	156,1	19,4
		3 по лин.	Разр.		Разр.		Разр.	Разр.	145,9	19
		5 по лин.	Разр.	Разр.	Разр.	Разр.	Разр.	Разр.	137,1	18,6

Анализ таблицы показывает, что даже при установке пяти ОПН напряжение на вводе остается на уровне порядка 137 кВ, что существенно превышает безопасные значения. Снижение амплитуды по сравнению с незащищенным режимом оказывается значительно менее выраженным, чем для импульсов 1,2/50 и 8/20. Практически все ОПН подвергаются разрушению вследствие превышения допустимой энергонагрузки.

Полученные результаты подтверждают, что при импульсе 10/350 определяющим фактором является интегральная энергия, а не только пиковое значение напряжения. Равномерная установка варисторных ОПН по линии в дан-

ном случае не обеспечивает требуемой устойчивости системы защиты.

В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть альтернативный вариант пространственной организации защиты с использованием МКР, обладающих дуговым механизмом ограничения перенапряжения и принципиально иной энергетической устойчивостью.

На рис. 2 показана расстановка МКР по линии для защиты ввода питания в РЩ.

В табл. 4 приведены результаты численного моделирования при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА с характеристикой 10/350 мкс при установке МКР по длине линии, при

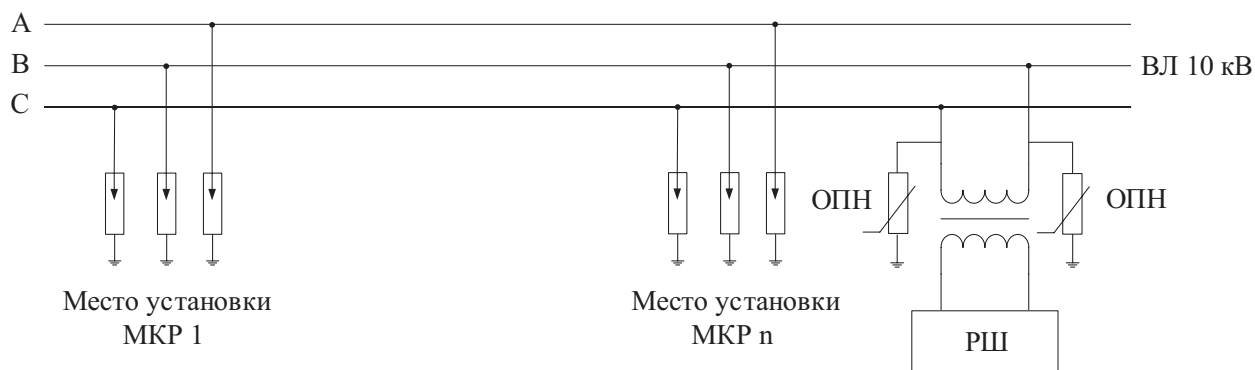


Рис. 2. Установка МКР по линии для защиты ввода питания в РЩ

ТАБЛИЦА 4. Результаты численного моделирования при ударе молнии импульсом 10/350 с использованием МКР

Амплитуда волны, кА	Хар-ка имп. мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж						Напряжение на вводе питания, кВ	Напряжение на устройствах, кВ	
			Место установки разрядников по линии, м								
			0	400	800	1200	1600	Вводное			
100	10/350	–							562,3	45	
		–						Разр.	217,1	27,6	
		1 по лин.	МКР.						3,2	48,6	9,6
		1 по лин.			МКР.				3,3	49,5	9,7
		1 по лин.					МКР		3,5	51,2	9,8
		2 по лин.	МКР					МКР	1,1	13,8	0,4
		2 по лин.	МКР			МКР.			1,2	12,3	0,4
		2 по лин.				МКР		МКР	1,3	14,1	0,4

этом ОПН непосредственно у ввода питания в РШ остается — для сглаживания остаточного импульса.

Анализ данных табл. 4 показывает, что применение МКР обеспечивает эффективное ограничение перенапряжения при импульсе тока 100 кА с характеристикой 10/350 мкс. Уже при установке одного МКР напряжение на вводе питания снижается до 48–51 кВ, что соответствует существенному уменьшению по сравнению с незащищенным режимом, но при этом данные напряжения все еще остаются опасными для устройств, поэтому установка одного МКР по линии является недостаточной.

При установке двух МКР напряжение на вводе дополнительно снижается до 12–14 кВ. Указанный уровень полностью соответствует требованиям электромагнитной устойчивости устройств ЖАТ и не приводит к пробое изоляции или повреждению вторичных цепей. Напряжение на защищаемых устройствах при этом находится на допустимом уровне

Распределение энергии между разрядниками носит устойчивый характер и не приводит к их разрушению. Энергия не концентрируется в одном аппарате, а перераспределяется между несколькими МКР, что подтверждает их способность воспринимать энергоемкий импульс без потери работоспособности.

Таким образом, равномерная установка МКР по линии обеспечивает снижение оста-

точного напряжения до безопасного уровня даже при воздействии импульса 10/350, что подтверждает высокую энергетическую устойчивость дугового механизма ограничения.

Результаты исследования защищенных подходов при серийных ударах молнии

Несмотря на полученные положительные результаты для одиночного импульса 10/350, в реальных условиях грозное воздействие нередко носит серийный характер и включает несколько последовательных разрядов с различной амплитудой и временными параметрами [20]. В этом случае защитная система работает в условиях повторной нагрузки, а определяющим фактором становится накопление энергии в аппаратах и изменение их состояния между импульсами.

В табл. 5 приведены результаты моделирования при воздействии серии ударов молнии. Рассматривалась последовательность импульсов, включающая первый удар повышенной амплитуды и последующие импульсы меньшей величины.

Анализ данных табл. 5 показывает, что при серийном воздействии установка двух МКР оказывается недостаточной: уровень остаточного напряжения на вводе питания остается высоким, что приводит к перегрузке ОПН и его разрушению. Таким образом, даже при

ТАБЛИЦА 5. Результаты численного моделирования при серийном ударе молнии с использованием МКР

Амплитуда волны, кА	Хар-ка имп. Мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж						Напряжение на вводе питания, кВ	Напряжение на устройствах, кВ
			Место установки разрядников по линии							
			1	2	3	4	5	ОЛ		
		-							637,3	55
		-						Разр.	417,1	39,3
100	10/350	1 по лин.	МКР.					Разр.	215,6	27,5
50	1,2/50	1 по лин.			МКР.			Разр.	217,2	27,6
40	1,2/50	1 по лин.					МКР	Разр.	223,3	27,8
30	1,2/50	2 по лин.	МКР				МКР	Разр.	126,8	18
20	1,2/50	2 по лин.	МКР		МКР.			Разр.	124,3	18,1
		2 по лин.			МКР		МКР	Разр.	128,1	18,2
		Защ. подход						1,1	13,3	0,4

наличии дуговых устройств по линии сохраняется критический режим для варисторного ограничителя на вводе, поскольку на него поступает волна перенапряжения, превышающая допустимый энергетический ресурс.

Следовательно, для устойчивой защиты при серийных ударах требуется иной принцип пространственной организации — не только ограничение в нескольких точках линии, но и формирование зоны локального демпфирования непосредственно перед вводом питания (защищенного подхода), обеспечивающей снижение амплитуды и энергии волны до уровня, безопасного для ОПН и вторичных цепей. Защищенный подход представляет собой установку МКР на четырех ближайших опорах

к вводу питания в РШ. На рис. 3 показано формирование защищенного подхода к вводу питания в РШ.

Результаты моделирования показывают, что при формировании защищенного подхода, предусматривающего установку четырех МКР на ближайших к вводу питания опорах, характер волнового процесса принципиально изменяется. Последовательное включение разрядников на коротком участке линии приводит к ступенчатому ограничению перенапряжения и существенному снижению амплитуды волны до ее поступления на ОПН, установленный на вводе питания.

Согласно данным табл. 5, в данном варианте максимальное напряжение на вводе питания

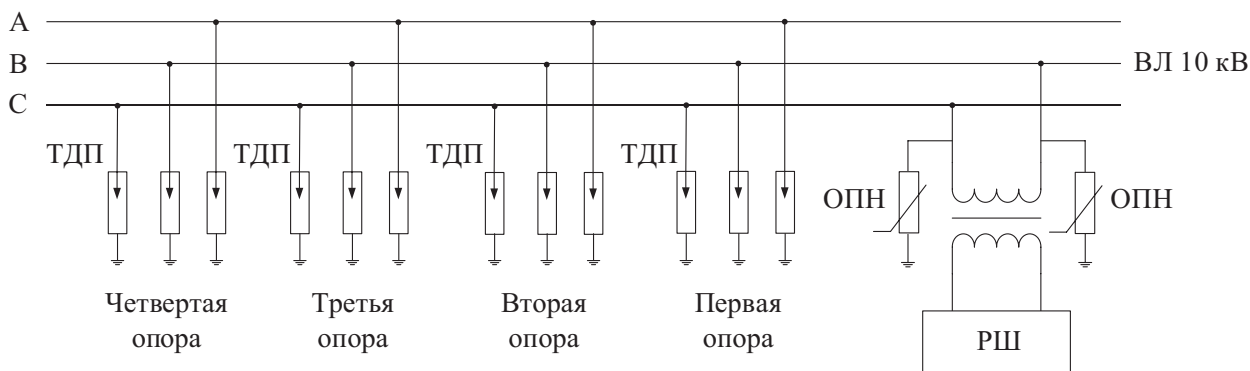


Рис. 3. Формирование защищенного подхода к вводу питания в РШ

не превышает безопасных значений для оборудования ЖАТ, а энергетическая нагрузка на ОПН остается в пределах его допустимого ресурса. Разрушение аппаратов не фиксируется. При этом напряжение на защищаемых вторичных устройствах находится на уровне, исключающем пробой изоляции и отказ аппаратуры.

Таким образом, формирование защищенного подхода обеспечивает не только снижение амплитуды перенапряжения, но и перераспределение энергии импульсного воздействия между несколькими дуговыми устройствами, что предотвращает перегрузку ОПН на вводе. Полученные результаты подтверждают, что пространственная концентрация средств защиты в непосредственной близости от защищаемого объекта является необходимым условием обеспечения устойчивости системы при серийных ударах молнии.

Заключение

В результате численного моделирования установлено, что эффективность защиты ввода питания устройств ЖАТ существенно зависит от временной формы грозового импульса и способа размещения защитных аппаратов на линии. При воздействии импульсов 1,2/50 и 8/20 мкс равномерная установка ОПН по длине ВЛ АБ 10 кВ обеспечивает снижение остаточного напряжения на вводе питания и на защищаемых устройствах. Однако такая схема не обеспечивает равномерного распределения энергии между средствами защиты: первые по направлению распространения волны ОПН воспринимают наибольшую нагрузку и могут разрушаться.

При воздействии энергоемкого импульса 10/350 мкс равномерная установка варисторных ОПН по линии оказывается недостаточной. Даже увеличение числа средств защиты не исключает превышения допустимой энергетической нагрузки и не обеспечивает снижения напряжения на вводе питания до требуемого уровня. Это показывает ограниченность схем защиты, построенных только на применении ОПН, при прямых и энергоемких грозовых воздействиях.

Показано, что применение МКР на подходе к вводу питания позволяет существенно повысить устойчивость системы защиты. В отличие от ОПН МКР обеспечивают дуговой ме-

ханизм отвода импульсной энергии и позволяют снизить нагрузку на вводной ОПН. При одиночном воздействии 10/350 мкс установка двух МКР на линии обеспечивает значительное снижение остаточного напряжения и предотвращает разрушение вводного ограничителя.

При серийных ударах молнии определяющим фактором становится не только амплитуда перенапряжения, но и накопление энергии во вводном ОПН при повторных импульсных воздействиях. Расчеты показали, что схемы с ограниченным числом МКР на линии не всегда обеспечивают устойчивый режим защиты вводов питания устройств ЖАТ. Наиболее эффективным является формирование защищенного подхода, предусматривающего установку МКР на ближайших к защищаемому объекту опорах ВЛ АБ. Такая конфигурация обеспечивает поэтапное ограничение грозовой волны, перераспределение импульсной энергии между несколькими дуговыми средствами защиты и снижение энергетической нагрузки на вводной ОПН до допустимого уровня.

Полученные результаты подтверждают, что защита вводов питания устройств ЖАТ должна рассматриваться не как локальная установка одного средства защиты у объекта, а как задача пространственного размещения средств защиты на участке линии, примыкающем к вводу питания. Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную проверку предложенной схемы защищенного подхода на физической модели или полигонном участке. ▲

Список источников

1. Соловьёв А.Д., Манаков А.Д. Анализ воздействия атмосферных перенапряжений на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 4. С. 287–302. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302. EDN MYPJAE
2. Соловьёв А.Д., Манаков А.Д. Волновые процессы при воздействии молнии в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ // Автоматика на транспорте. 2026. Т. 12, № 1. С. 56–72. DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-01-56-72. EDN LEQTWD
3. Манаков А.Д., Балуев Н.Н. Усиление защиты вводов питания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при близких грозовых разрядах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 1 (26). С. 73–80. EDN NTZCCD

4. Rakov V.A., Uman M.A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 687 p.
5. Malcolm N., Aggarwal R.K. The Impact of Multiple Lightning Strokes on the Energy Absorbed by MOV Surge Arresters in Wind Farms During Direct Lightning Strikes // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 83. Pp. 1305–1314. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.010
6. Efficient Procedure to Evaluate Electromagnetic Transients: Transmission Line Model Based on Lumped Elements and State-Space Techniques / E.C.M. Costa [et al.] // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2010. DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0660
7. *Power System Transients: Theory and Applications* / A. Ametani [et al.]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 600 p.
8. Mamiş M.S., Nacaroglu A. Transient Voltage and Current Distributions on Transmission Lines // *IEE Proceedings — Generation, Transmission and Distribution*. 2002. Vol. 149, no. 6. Pp. 705–712. DOI: 10.1049/ip-gtd:20020625
9. Hosseini S.M.A., Mohammadirad A., Akmal A.A. Surge Analysis on Wind Farm Considering Lightning Strike to Multi-Blade // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 186. Pp. 312–326. DOI: 10.1016/j.renene.2021.12.061
10. Grcev L. Impulse Efficiency of Ground Electrodes // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. Vol. 24, no. 1. Pp. 441–451. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923396
11. Diagnostic Analysis and Protective Measures of Transient Ground Potential Rise in a 1000 kV UHV Substation / F. Pang [et al.] // *The Journal of Engineering*. 2018. No. 17. Pp. 1670–1674. DOI: 10.1049/joe.2018.8638
12. Gustavsen B., Semlyen A. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1999. Vol. 14, no. 3. Pp. 1052–1061. DOI: 10.1109/61.772353
13. Lee B.-H., Joe J.-H., Choi J.-H. Simulations of Frequency-dependent Impedance of Ground Rods Considering Multi-layered Soil Structures // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2009. Vol. 4, no. 4. Pp. 531–537. DOI: 10.5370/JEET.2009.4.4.531
14. On the Computation of the Voltage Distribution along the Non-Linear Resistor of Gapless Metal Oxide Surge Arresters / C.A. Christodoulou [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 11. Art. 3046. DOI: 10.3390/en11113046
15. Quality Assessment of Low Voltage Surge Arresters / L.S. Litzbarski [et al.] // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 129313–129321. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3226401
16. Бельский Р.А., Фролов В.Я., Подпоркин Г.В. Электрическая прочность разрядника для молниезащиты линий 6–35 кВ при грозовых перенапряжениях // *Записки Горного института*. 2018. Т. 232. С. 401–406. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.401
17. Shampine L.F., Reichelt M.W. The MATLAB ODE Suite // *SIAM Journal on Scientific Computing*. 1997. Vol. 18, no. 1. Pp. 1–22. DOI: 10.1137/S1064827594276424
18. Critical Insight into Performance Requirements and Test Methods for Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems / T.E. Tsovilis [et al.] // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 36, no. 5. Pp. 3055–3064. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3032763
19. Lightning Performance Analysis of a Rooftop Grid-Connected Solar Photovoltaic Without External Lightning Protection System / M.S.M. Nasir [et al.] // *PLOS ONE*. 2019. Vol. 14, no. 7. Art. e0219326. DOI: 10.1371/journal.pone.0219326
20. Rakov V.A. A Review of Positive and Bipolar Lightning Discharges // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2003. Vol. 84, no. 6. Pp. 767–776. DOI: 10.1175/BAMS-84-6-767

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 2, pp. 114–127
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-114-127

Protected Approaches to Power Supply Inputs of Railway Automation and Remote Control Devices under Lightning Strikes

Information about authors

Solov'yov A. D., Postgraduate Student of the "Automation and Remote Control on Railways" Department; e-mail: Shura.Solovyov.01@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Abstract: the article addresses the protection of power supply inputs of railway automation and remote-control devices against lightning overvoltages propagating along 10 kV overhead autoblocking lines. It is shown that during

direct and repeated lightning strikes, the surge arrester installed directly at the protected facility may be subjected to unacceptable current and energy loads, which reduces the stability of the protection system. To investigate these processes, an integrated mathematical model of the system "overhead line – power supply input – protective devices" has been developed, including a three-phase distributed-parameter line model, a lightning impact source based on the Heidler function, a relay cabinet power supply input model, a frequency-dependent grounding system model, and nonlinear models of surge arresters and multi-chamber arresters. The numerical implementation of the model was carried out in MATLAB. Computational experiments were performed for single and multiple lightning strikes under various protected-approach configurations and different arrangements of protective devices along the line. It was found that the uniform installation of surge arresters along the line does not provide the required stability under high-energy 10/350 μs impulses due to the exceedance of the permissible energy load of the devices. It is shown that the use of multi-chamber arresters makes it possible to significantly reduce

the voltage at the power supply input and the load on the input surge arrester. The results obtained confirm the promise of spatially organized protection schemes that provide step-by-step limitation of the lightning wave and redistribution of impulse energy among several devices under single and multiple lightning strikes.

Keywords: lightning strike, mathematical model, protected approaches, impulse overvoltages, railway automation and remote control

References

- Solov'yov A. D., Manakov A. D. Analiz vozdeystviya atmosferykh perenapryazhenij na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki [Analysis of the Impact of Atmospheric Overvoltages on Railway Automation and Telemechanics Devices], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2025, vol. 11, no. 4, pp. 287–302. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302. EDN MYPJAE (In Russian)
- Solov'yov A. D., Manakov A. D. Volnovye protsessy pri vozdeystvii molnii v vysokovol'noy linii avtoblokirovki 10 kV [Wave Processes under Lightning Impact in a 10 kV High-Voltage Automatic Block Signalling Line], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2026, vol. 12, no. 1, pp. 56–72. DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-01-56-72. EDN: LEQTWD (In Russian)
- Manakov A. D., Baluev N. N. Usilenie zashchity vvodov pitaniya ustroystv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki pri blizkikh grozovykh razryadakh [Strengthening the Protection of Power Supply Inputs of Railway Automation and Telemechanics Devices Under Nearby Lightning Discharges], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2011, no. 1 (26), pp. 73–80. EDN NTZCCD (In Russian)
- Rakov V. A., Uman M. A. Lightning: Physics and Effects, Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 687 p.
- Malcolm N., Aggarwal R. K. The Impact of Multiple Lightning Strokes on the Energy Absorption Capability of MOV Surge Arresters in Wind Farms During Direct Lightning Strikes, *Renewable Energy*, 2015, vol. 83, pp. 1305–1314. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.010
- Costa E. C. M., et al. Efficient Procedure to Evaluate Electromagnetic Transients: Transmission Line Model Based on Lumped Elements and State-Space Techniques, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2010. DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0660
- Ametani A., et al. Power System Transients: Theory and Applications, 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2013. 488 p.
- Mamiş M. S., Nacaroğlu A. Transient Voltage and Current Distributions on Transmission Lines, *IEE Proceedings — Generation, Transmission and Distribution*, 2002, vol. 149, no. 6, pp. 705–712. DOI: 10.1049/ip-gtd:20020625
- Hosseini S. M. A., Mohammadirad A., Akmal A. A. Surge Analysis on Wind Farm Considering Lightning Strike to Multi-Blade, *Renewable Energy*, 2022, vol. 186, pp. 312–326. DOI: 10.1016/j.renene.2021.12.061
- Grcev L. Impulse Efficiency of Ground Electrodes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 441–451. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923396
- Pang F., et al. Diagnostic Analysis and Protective Measures of Transient Ground Potential Rise in a 1000 kV UHV Substation, *The Journal of Engineering*, 2018, no. 17, pp. 1670–1674. DOI: 10.1049/joe.2018.8638
- Gustavsen B., Semlyen A. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061. DOI: 10.1109/61.772353
- Lee B. H., Joe J.-H., Choi J.-H. Simulations of Frequency-dependent Impedance of Ground Rods Considering Multi-layered Soil Structures, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2009, vol. 4, no. 4, pp. 531–538. DOI: 10.5370/JEET.2009.4.4.531
- Christodoulou C. A., et al. On the Computation of the Voltage Distribution along the Non-Linear Resistor of Gapless Metal Oxide Surge Arresters, *Energies*, 2018, vol. 11, no. 11, art. 3046. DOI: 10.3390/en11113046
- Litzbarski L. S., et al. Quality Assessment of Low Voltage Surge Arresters, *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 129313–129321. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3226401
- Belskii R. A., Frolov V. Ya., Podporokin G. V. Elektricheskaya prochnost' razryadnika dlya molniezashchity linij 6–35 kV pri grozovykh perenapryazheniyakh [Electrical Strength of an Arrester for Lightning Protection Of 6–35 Kv Lines Under Lightning Overvoltages], *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 2018, vol. 229, pp. 30–36. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.30 (In Russian)
- Shampine L. F., Reichelt M. W. The MATLAB ODE Suite, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1997, vol. 18, no. 1, pp. 1–22. DOI: 10.1137/S1064827594276424
- Tsovilis T. E., et al. Critical Insight into Performance Requirements and Test Methods for Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, vol. 36, no. 5, pp. 3055–3064. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3032763
- Nasir M. S. M., et al. Lightning Performance Analysis of a Rooftop Grid-Connected Solar Photovoltaic Without External Lightning Protection System, *PLOS ONE*, 2019, vol. 14, no. 7, art. e0219326. DOI: 10.1371/journal.pone.0219326
- Rakov V. A. A Review of Positive and Bipolar Lightning Discharges, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, vol. 84, no. 6, pp. 767–776. DOI: 10.1175/BAMS-84-6-767