

УДК 656.25+621.316.9+621.315.1

Волновые процессы в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ при серийных ударах молнии

А. Д. Соловьёв

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Соловьёв А. Д. Волновые процессы в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ при серийных ударах молнии // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 105–117. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-105-117

Аннотация

Цель: исследование волновых процессов в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ при серийных ударах молнии с учетом накопления энергии и деградации ограничителей перенапряжений, а также оценка влияния этих факторов на эффективность молниезащиты линии. **Методы:** использованы математическое и численное моделирование во временной области, основанное на методе переменных состояний, с применением аналитического задания токов молнии (функция Хайдлера), динамической модели канала молнии и энергетически зависимой модели ограничителей перенапряжений. **Результаты:** показано, что при серийных ударах молнии волновые процессы в линии накладываются во времени, что приводит к увеличению уровней перенапряжений. Установлено, что энергия, рассеиваемая в ограничителях перенапряжений, накапливается от удара к удару и достигает предельных значений уже при нескольких воздействиях. Выявлено, что работоспособность ОПН определяется не только мгновенными параметрами импульсов, но и суммарной энергетической нагрузкой, приводящей к деградации и возможному отказу устройства. **Практическая значимость:** заключается в возможности использования разработанной модели для расчетного анализа серийных грозовых воздействий и оценки энергетической нагруженности ограничителей перенапряжений при проектировании систем молниезащиты высоковольтных линий автоблокировки. Полученные результаты позволяют обосновать необходимость учета накопительных эффектов и перехода к энергетически согласованным схемам защиты, включая применение защищенных подходов к объектам железнодорожной автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: молния, серийные удары, волновые процессы, железнодорожная автоматика и телемеханика, энергетическая стойкость

Введение

Воздействие молнии на высоковольтные линии (ВЛ) автоблокировки (АБ), используемые для электроснабжения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), является одной из основных причин возникновения импульсных перенапряжений [1]. В работе [2] была разработана и верифицирована математическая модель трехфазной ВЛ АБ напряжением 10 кВ, позволяющая анализировать волновые процессы при одиночном ударе молнии во временной области с учетом распределенных параметров линии, межфазных электромагнитных связей, динамики канала молнии и работы ограничителей перенапряжения нелинейных (ОПН). Полученные результаты показали, что уровни волновых

перенапряжений существенно зависят от конфигурации линии и средств защиты и могут достигать максимальных значений в точках, удаленных от места приложения грозового воздействия.

В то же время реальные грозовые разряды, как правило, имеют серийный характер и состоят из последовательности возвратных ударов, следующих с малыми временными интервалами [3–4]. В таких условиях электромагнитные процессы, вызванные предыдущими импульсами, не успевают полностью затухнуть, а воздействие молнии на линию и подключенные защитные устройства приобретает накопительный характер. Анализ волновых процессов при одиночном ударе не позволяет корректно оценить эволюцию перенапряжений и нагрузку на защитные устройства при серийных грозовых воздействиях [5].

Особую роль при серийных ударах молнии играют ОПН, работа которых определяется не только мгновенными значениями напряжения и тока, но и суммарной энергией, рассеиваемой за время воздействия. Последовательное приложение нескольких импульсов может приводить к накоплению энергии, тепловой деградации ОПН и изменению условий формирования волновых процессов в линии при последующих ударах [6]. Данные эффекты принципиально не учитываются в моделях, ориентированных исключительно на одиночные грозовые импульсы, и требуют специального анализа [7].

В настоящей работе рассматривается задача исследования волновых процессов в ВЛ АБ 10 кВ при серийных ударах молнии с учетом накопительных эффектов в ОПН. Серийное грозовое воздействие моделируется в виде последовательности импульсов тока, прикладываемых к линии с заданными временными интервалами, при сохранении энергетического и электрического состояния системы между ударами. Математическая модель линии, основанная на методе переменных состояния и ранее верифицированная для одиночного удара, расширяется за счет учета накопления энергии и деградации ограничителей перенапряжений. Целью работы является анализ эволюции волновых перенапряжений и энергетической нагрузки ограничителей перенапряжений от удара к удару, а также оценка влияния серийных грозовых воздействий на эффективность молниезащиты линии автоблокировки.

Математическая модель серийных грозовых воздействий

Для анализа волновых процессов в ВЛ АБ 10 кВ при серийных ударах молнии используется математическая модель, основанная на методе переменных состояния, ранее выведенная и верифицированная для случая одиночного грозового воздействия. В рамках данной модели линия, источник грозового воздействия и защитные устройства рассматриваются как единая динамическая система, поведение которой описывается во временной области. В общем виде динамика системы представляется в компактной матричной форме:

$$M\dot{x}(t) = Ax(t) + b(t) + \varphi(x, t), \quad (1)$$

где $Ax(t)$ — линейный оператор, описывающий внутреннюю динамику линии и ее топологию;

$b(t)$ — вектор представления внешнего грозового воздействия;

$\varphi(x, t)$ — нелинейная функция, включающая вклад нелинейных и энергетических эффектов.

При переходе от одиночного удара к серийному базовая структура уравнения (1) сохраняется, а изменения касаются формы внешнего воздействия и состава вектора состояния.

Реальный грозовой разряд, как правило, представляет собой последовательность возвратных ударов, следующих с малыми временными интервалами [8]. Для формального описания такого воздействия в рамках временной модели ток молнии задается в виде суммы отдельных импульсов:

$$i_L(t) = \sum_{r=1}^{N_S} i_{H,r}(t-t_r), \quad (2)$$

где N_S — число ударов в серии;

$i_{H,r}(t)$ — временная зависимость тока r -го удара;

t_r — момент начала r -удара.

Такое представление позволяет рассматривать серию ударов как единый нестационарный процесс с сохранением внутренних состояний системы между импульсами.

При этом серия ударов в расчетной модели задается не только числом импульсов, но и совокупностью их временных и амплитудных параметров. К основным параметрам серии относятся число ударов m , амплитуда тока каждого удара $I_{p,r}$, постоянные времени фронта и спада $\tau_{1,r}$, $\tau_{2,r}$, показатель крутизны фронта n_r , а также моменты начала отдельных ударов t_r . Интервал между последовательными ударами определяется как $\Delta t_r = t_{r+1} - t_r$. Следовательно, влияние серийного грозового воздействия на линию определяется не только амплитудами отдельных импульсов, но и их взаимным расположением во времени, от которого зависит степень наложения волновых процессов.

Форма тока каждого отдельного удара аппроксимируется аналитической функцией Хайдлера [9]:

$$i_{H,r}(t) = I_p \cdot \frac{(t/\tau_{1,r})^{n_r}}{1 + (t/\tau_{1,r})^{n_r}} \cdot e^{-t/\tau_{2,r}}, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

где $I_{0,r}$ — амплитуда тока r -го удара;

$\tau_{1,r}$ — постоянная времени, определяющая крутизну фронта импульса молнии;

$\tau_{2,r}$ — постоянная времени, определяющая длительность спада импульса молнии;

n_r — показатель степени, задающий крутизну нарастания фронта тока;
 t — время с момента начала грозового разряда.

Использование данной аппроксимации позволяет воспроизводить характерные временные параметры возвратных ударов молнии [10].

В настоящей работе в качестве базового расчетного сценария принята серия из трех последовательных импульсов. Такой выбор обусловлен тем, что указанная последовательность является минимальной серией, позволяющей одновременно выявить два характерных эффекта: наложение волновых процессов в линии и накопление энергии в ограничителях перенапряжений от удара к удару. Первый импульс принят более энергоемким, а второй и третий импульсы заданы с меньшей длительностью хвоста, что отражает различие между первым и последующими ударами в составе грозового разряда. Интервал между импульсами, равный 40 мкс, рассматривается как неблагоприятный расчетный интервал, выбранный для анализа режима, при котором последующий импульс приходит до полного затухания переходного процесса от предыдущего воздействия.

Серийный ток молнии вводится в систему уравнений (1) через вектор внешних воздействий:

$$b(t) = b_0 + e_p i_L(t), \quad (4)$$

где b_0 — вектор постоянных внешних воздействий, связанных с граничными условиями линии;

e_p — единичный вектор, определяющий фазу и узел приложения грозового воздействия;

$i_L(t)$ — ток молнии.

Такая форма записи подчеркивает, что серийность удара отражается исключительно во временной зависимости внешнего воздействия.

Для более корректного описания взаимодействия источника грозового воздействия с линией в модель вводится динамическое представление канала молнии [11]. В этом случае ток канала рассматривается как дополнительная переменная состояния и определяется дифференциальным уравнением:

$$L_{ch} \frac{di_{ch}(t)}{dt} = u_{eq}(t) - R_{ch} i_{ch}(t) - u_m(t), \quad (5)$$

где $i_{ch}(t)$ — ток канала молнии;

L_{ch} — эквивалентная индуктивность канала молнии;

R_{ch} — эквивалентное активное сопротивление канала молнии;

$u_{eq}(t)$ — эквивалентная ЭДС канала молнии;

$u_m(t)$ — мгновенное напряжение в точке удара на линии.

Данное уравнение позволяет учитывать обратное влияние волновых процессов в линии на форму тока канала.

Эквивалентная ЭДС канала при серийных ударах задается в виде суммы временно сдвинутых функций:

$$u_{eq}(t) = \sum_{r=1}^{N_s} u_{eq,r}(t-t_r), \quad (6)$$

где $u_{eq,r}(t)$ — эквивалентная ЭДС, соответствующая r -му удару.

Такое задание обеспечивает корректную временную суперпозицию отдельных ударов в рамках одной серии.

Ключевым фактором, отличающим серийные грозовые воздействия от одиночного удара, является накопление энергии в ограничителях перенапряжений [12]. Для количественного описания этого процесса для каждого ограничителя вводится энергетическая переменная, динамика которой определяется выражением:

$$\frac{dW_k(t)}{dt} = \max [u_{opn,k}(t)i_{opn,k}(t), 0], \quad (7)$$

где $W_k(t)$ — накопленная энергия k -го ограничения перенапряжения;

$u_{opn,k}(t)$ — мгновенное значение напряжения на ОПН;

$i_{opn,k}(t)$ — мгновенное значение тока ОПН.

Использование оператора $\max(\cdot, 0)$ связано с тем, что в энергетическом критерии учитывается только энергия, рассеиваемая в средстве защиты.

В отличие от одиночного удара при серийных воздействиях накопленная энергия сохраняется между отдельными импульсами, что отражается соотношением:

$$W_k(t_{r+1}^-) = W_k(t_r^+) + \int_{t_r^+}^{t_{r+1}^-} \max [u_{opn,k}(\tau)i_{opn,k}(\tau), 0] d\tau, \quad (8)$$

где $W_k(t_r^+)$ — накопленная энергия k -го ОПН после r -го импульса;

$W_k(t_{r+1}^-)$ — накопленная энергия k -го ОПН непосредственно перед началом следующего, $(r+1)$ -го, импульса;

t_r^+ — момент времени после r -го импульса;

t_{r+1}^- — момент времени непосредственно перед началом следующего импульса;

τ — вспомогательная переменная интегрирования по времени.

Выражение (8) показывает, что между отдельными ударами серии энергетическое состояние ограничителя не обнуляется. Каждый последующий импульс воздействует на ОПН с учетом энергии, накопленной при предыдущих импульсах и переходных процессах между ними.

Рост накопленной энергии приводит к изменению защитных свойств ОПН и в предельном случае к их отказу [13]. Для описания этого эффекта вводится безразмерная переменная целостности $a_k(t)$, эволюция которой определяется соотношением:

$$a_k(t) = \left\{ \begin{array}{ll} 1, & W_k(t) < W_{\text{lim},k} \\ 0, & W_k(t) \geq W_{\text{lim},k} \end{array} \right\}, \quad (9)$$

где $W_{\text{lim},k}$ — предельно допустимая энергия k -го ОПН;

$a_k(t) = 1$ соответствует работоспособному состоянию ОПН;

$a_k(t) = 0$ соответствует отказу ОПН.

До достижения предельной энергии ОПН описывается заданной нелинейной вольт-амперной характеристикой. При выполнении условия ограничитель считается разрушенным, а соответствующая ветвь в расчетной схеме переводится в состояние электрического обрыва. В расчетной модели это задается выражением:

$$i_{\text{ОПН},k}(t) = a_k(t) f_{\text{ВАХ}}(u_{\text{ОПН},k}(t)). \quad (10)$$

Следовательно, при $a_k(t) = 0$ ток через ОПН становится равным нулю, что соответствует обрыву ветви после разрушения ограничителя.

С учетом серийного характера грозового воздействия и энергетических процессов в ограничителях перенапряжений вектор состояния системы принимает вид:

$$x(t) = [i(t) \ u(t) \ i_{ch}(t) \ W(t) \ a(t)]^T. \quad (11)$$

Такой выбор вектора состояния позволяет рассматривать серию ударов молнии как единый нестационарный процесс с сохранением информации о предшествующих воздействиях.

Численные эксперименты и анализ результатов

В данном разделе выполнено численное исследование волновых процессов в ВЛ АБ напряжением 10 кВ при воздействии серии из трех последовательных ударов молнии. Расчеты проводились на основе ранее разработанной и верифицированной математической модели волновых процессов в линиях с распределенными параметрами, реализованной во временной области и дополненной учетом нелинейных характеристик ограничителей перенапряжений и их энергетического ресурса.

В качестве грозового воздействия рассматривалась серия токовых импульсов, заданных аналитической формой Хайдлера. Параметры импульсов выбирались таким образом, чтобы первый удар обладал повышенной энергоемкостью, а последующие удары имели меньшую амплитуду и более короткий хвост, что соответствует характеру реальных серийных грозовых разрядов [14–15]. Амплитуда первого удара составляла 20 кА при параметрах импульса 1,2/50 мкс. Для второго и третьего ударов амплитуда тока принималась равной 18 кА при параметрах импульса 0,8/40 мкс. Интервал между последовательными ударами в серии составлял 40 мкс, что существенно меньше времени полного затухания волновых процессов в линии и тем самым обеспечивает их наложение. Форма тока источника, соответствующая рассматриваемой серии ударов, приведена на рис. 1.

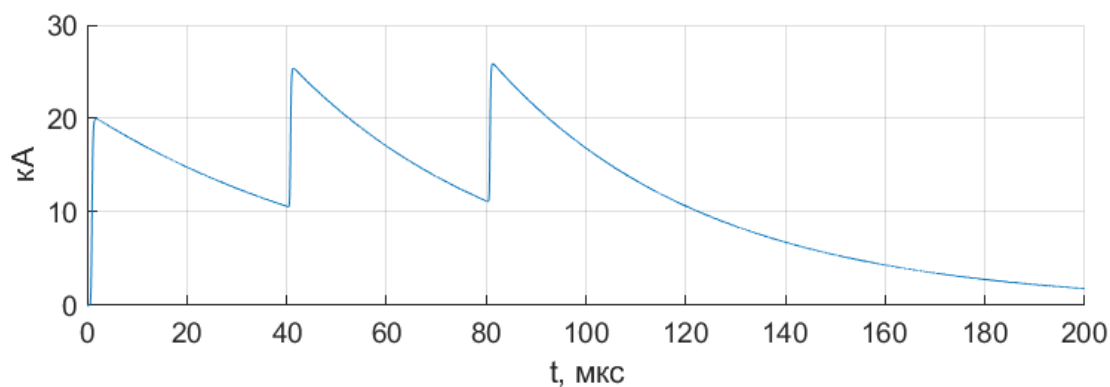


Рис. 1. Форма тока источника, соответствующая серии из трех последовательных ударов молнии

Для оценки влияния основных параметров серии дополнительно анализировалось изменение амплитуды последующих ударов, временного интервала между импульсами, длительности хвоста и числа ударов в серии. Расчеты показали, что максимальные фазные напряжения в конце линии наиболее чувствительны к амплитуде импульсов и междударному интервалу: при уменьшении интервала возрастает степень наложения падающих и отраженных волн, что приводит к увеличению локальных максимумов напряжения. В отличие от этого накопленная энергия ОПН определяется не только амплитудой импульса, но и длительностью хвоста и числом последовательных воздействий, поскольку энергия является интегральной характеристикой процесса.

На рис. 1 отчетливо видна временная структура рассматриваемой серии грозовых воздействий. Каждый импульс характеризуется быстрым нарастанием тока и сравнительно длительным затухающим хвостом, что соответствует физике возвратных ударов молнии. Интервалы между ударами выбраны существенно меньшими времени полного затухания тока, вследствие чего последующие импульсы накладываются на остаточные процессы от предыдущих воздействий. Такая форма токового воздействия создает неблагоприятные условия для работы ограничителей перенапряжений и позволяет выявить накопительные энергетические эффекты при серийных ударах.

Следует отметить, что выбранный интервал между импульсами используется как расчетный неблагоприятный случай. Его уменьшение усиливает наложение волновых процессов, тогда как увеличение интервала приводит к более независимому протеканию переходных процессов от каждого удара. Поэтому временной интервал между импульсами является одним из ключевых параметров, влияющих на форму напряжений в конце линии.

На рис. 2 представлены временные зависимости фазных напряжений в конце линии. Анализ графиков показывает, что каждый удар молнии сопровождается формированием перенапряженной волны с крутым фронтом и последующим

затухающим хвостом, обусловленным отражениями от неоднородностей линии и поглощающим действием нагрузки. При этом второй и третий удары накладываются на незатухшие остаточные колебания от предыдущих воздействий, что приводит к увеличению общего уровня напряжений и усложнению формы временных зависимостей. Наблюдаемая разница амплитуд фазных напряжений связана с асимметрией электромагнитной связи фазных проводников и локализацией точки удара. Наибольшие значения перенапряжений реализуются в фазе А, что является физически ожидаемым результатом при заданной постановке задачи.

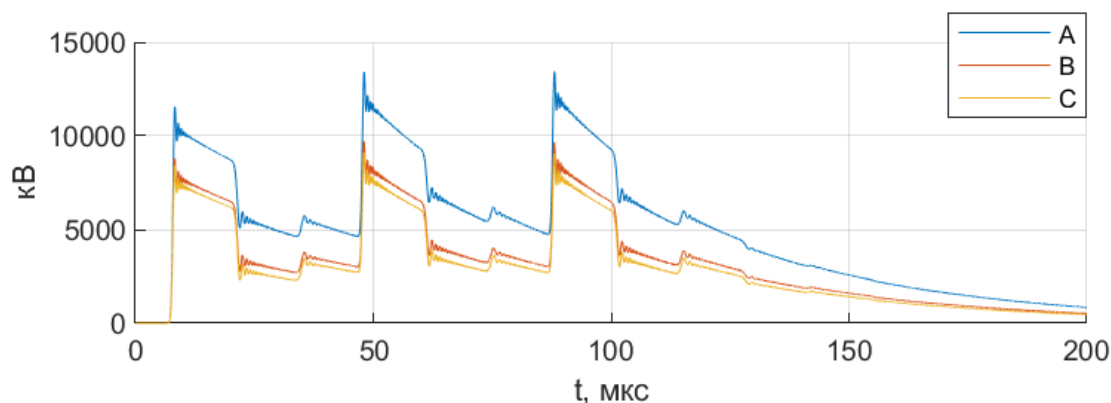


Рис. 2. Временные зависимости фазных напряжений в конце ВЛ АБ 10 кВ при воздействии серии из трех ударов молнии

Таким образом, влияние параметров серии на максимальные перенапряжения проявляется преимущественно через амплитуду импульсов и временной интервал между ними. Увеличение амплитуды приводит к росту падающей волны перенапряжения, а уменьшение интервала между ударами повышает вероятность прихода последующего импульса на фоне незатухших отраженных волн. Поэтому при оценке максимальных напряжений определяющими параметрами являются $I_{p,r}$ и Δt_r .

Особый интерес представляет анализ энергетической нагрузки ограничителей перенапряжений при серийных грозовых воздействиях. На рис. 3 показаны зависимости энергии, рассеиваемой в ОПН, от времени для каждой фазы. Характер изменения энергии имеет выражено ступенчатый вид: каждому удару молнии соответствует резкое приращение энергии, после чего наблюдается участок относительно медленного роста, связанный с затуханием токов через ограничитель. При этом энергия не возвращается к исходному уровню между ударами, что свидетельствует об отсутствии энергетической разгрузки ОПН в интервалах между воздействиями.

Полученные результаты наглядно показывают, что уже при трех последовательных ударах суммарная энергия, рассеиваемая в ограничителях перенапряжений, достигает нормативных значений порядка 3–4 кДж на фазу, соответствующих предельной допустимой энергетической нагрузке для ограничителей данного

класса. Несмотря на то что основной вклад в энергию вносит первый, наиболее мощный удар, последующие удары формируют существенное дополнительное приращение энергии, что подчеркивает принципиальную опасность серийных грозовых воздействий даже при умеренных амплитудах тока. Таким образом, результаты численных экспериментов показывают, что при серийных ударах молнии определяющим фактором работоспособности ограничителей перенапряжений становится не только уровень мгновенных перенапряжений, но и накопление энергии во времени, приводящее к возможному разрушению ОПН в процессе серии и резкому ухудшению условий защиты объекта.

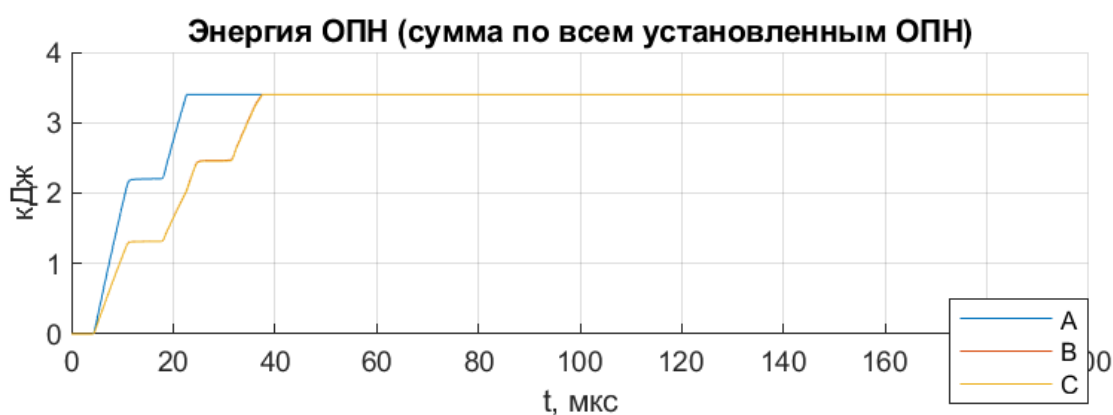


Рис. 3. Изменение энергии, рассеиваемой в ОПН, по фазам при серийных ударах молнии

Анализ влияния параметров серии показывает, что энергетическая нагрузка ОПН зависит от параметров импульса иначе, чем максимальное напряжение. Если максимум напряжения в большей степени определяется амплитудой и моментом прихода очередного импульса, то энергия ОПН определяется интегралом мощности во времени. Поэтому существенное влияние на нее оказывают длительность хвоста импульса, число ударов в серии и отсутствие обнуления энергетического состояния между последовательными воздействиями. Это объясняет, почему последующие удары даже при меньшей амплитуде способны заметно увеличить суммарную энергию, рассеиваемую в ОПН.

Заключение

По результатам исследования показано, что при серийных ударах молнии уровни перенапряжений и характер волновых процессов определяются не только параметрами отдельных импульсов, но и остаточными процессами от предыдущих ударов. В ограничителях перенапряжений реализуется ступенчатое накопление энергии, при котором уже при трех последовательных ударах достигаются нормативные значения порядка 3–4 кДж на фазу, соответствующие предельно допустимой энергетической нагрузке для ограничителей данного класса.

Установлено, что при серийных грозových воздействиях определяющим фактором работоспособности молниезащиты становится энергетическая стойкость ограничителей перенапряжений, а не только их способность ограничивать мгновенные перенапряжения. Разрушение ОПН в процессе серии приводит к резкому ухудшению условий защиты линии автоблокировки и подключенных устройств железнодорожной автоматики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием математических моделей комплексных средств молниезащиты, формирующих защищенный подход к объекту, включая не только ОПН, но и искровые промежутки, разрядники, комбинированные устройства. Представляет интерес разработка унифицированных моделей таких средств с учетом их нелинейных и энергетических характеристик при серийных грозových воздействиях, а также анализ их совместной работы в составе защищенных подходов устройств ЖАТ.

Список источников

1. Соловьев 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. Соловьев 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
3. Rakov V.A., Uman M.A., Thottappillil R. Review of Lightning Properties from Electric Field and TV Observations // Journal of Geophysical Research. 1994. Vol. 99, no. D5. Pp. 10745–10750. DOI: 10.1029/93JD01205
4. Bazelyan E. M., Raizer Y. P. Lightning Physics and Lightning Protection. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2000.
5. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines / C.A. Nucci [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1993. Vol. 35, no. 1. Pp. 75–86.
6. Rachidi F. A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models with Special Emphasis to Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2012. Vol. 54, no. 4. Pp. 898–911. DOI: 10.1109/TEMC.2011.2181519
7. Borghetti A., Nucci C.A. Paolone, M. An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22, no. 1. Pp. 684–692. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.881463
8. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003. DOI: 10.1017/CBO9781107340886
9. Heidler F. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung // Proceedings of the 18th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Munich, 1985. Pp. 63–66.

10. Furgal J. Influence of Lightning Current Model on Simulations of Overvoltages in High Voltage Overhead Transmission Systems // *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 2. Art. 296. DOI: 10.3390/en13020296

11. Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation / M. Paolone [et al.] // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19, no. 1. Pp. 423–431. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.8201

12. The Impact of Multiple Lightning Strokes on the Energy Absorbed by MOV Surge Arresters in Wind Farms during Direct Lightning Strikes / N. Malcolm [et al.] // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 83. Pp. 1305–1315. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.046

13. Zanetta L. C. Jr. Evaluation of Line Surge Arrester Failure Rate for Multipulse Lightning Stresses // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. Vol. 18, no. 3. Pp. 796–801. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.813862

14. Features of the First and the Subsequent Return Strokes in Positive Ground Flashes Based on Electric Field Measurements / D. Johari [et al.] // *Electric Power Systems Research*, 2017. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.04.031

15. Lightning Current Distribution of the First and Subsequent Strokes Based on the Lightning Location System: Survey in Yunnan Power Grid / Y. Ma [et al.] // *Atmosphere*. 2025. DOI: 10.3390/atmos16010015

Дата поступления: 01.04.2026

Решение о публикации: 18.05.2026

Контактная информация:

СОЛОВЬЁВ Александр Дмитриевич — аспирант; shura.solovyov.01@mail.ru

Wave Processes in a 10 kV High-Voltage Railway Signalling Line Subjected to Serial Lightning Strikes

A. D. Solov'yov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Solov'yov A. D. Wave Processes in a 10 kV High-Voltage Railway Signalling Line Subjected to Serial Lightning Strikes // Bulletin of Scientific Research Results*, 2026, iss. 2, pp. 105–117. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-105-117 (In Russian)

Abstract

Objective: the objective of this study is to investigate wave processes in a 10 kV high-voltage automatic block line under multiple lightning strokes, taking into account energy accumulation and degradation of surge arresters, as well as to assess the influence of these factors on the effectiveness of lightning protection. **Methods:**

the study employs mathematical and numerical modeling in the time domain based on the state-space method. Lightning currents are represented using the analytical Heidler function, combined with a dynamic model of the lightning channel and an energy-dependent model of surge arresters. **Results:** it is shown that under multiple lightning strokes, wave processes in the line overlap in time, leading to increased overvoltage levels. It is established that the energy dissipated in surge arresters accumulates from stroke to stroke and reaches critical values after only a few events. It is demonstrated that the performance of surge arresters is determined not only by instantaneous voltage and current values, but also by the cumulative energy load, which may lead to degradation and eventual failure. **Practical significance:** the practical significance of the study lies in the applicability of the developed model for analyzing multiple lightning events and evaluating the energy loading of surge arresters in the design of lightning protection systems for high-voltage automatic block lines. The results substantiate the necessity of accounting for cumulative effects and transitioning to energy-coordinated protection schemes, including the implementation of protected approaches for railway automation and remote control systems.

Keywords: lightning, serial lightning strikes, wave processes, railway automation and remote control, energy withstand capability

References

1. Solov'yov A. D., Manakov A. D. Analiz vozdeystviya atmosferykh perenapryazhenij na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Analysis of the Impact of Atmospheric Overvoltages on Railway Signaling and Interlocking Systems], *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)
2. Solov'yov A. D., Manakov A. D. Volnovye protsessy pri vozdeystvii molnii v vysokovol'tnoj linii avtoblokirovki 10 kv [Wave Processes Under Lightning Impact in a 10 kv High-Voltage Automatic Block 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 (In Russian)
3. Rakov V. A., Uman M. A., Thottappillil R. Review of Lightning Properties from Electric Field and TV Observations, *Journal of Geophysical Research*, 1994, vol. 99, no. D5, pp. 10745–10750. DOI: 10.1029/93JD01205
4. Bazelyan E. M., Raizer Y. P. Lightning Physics and Lightning Protection. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2000.
5. Nucci C. A., et al. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, vol. 35, no. 1, pp. 75–86.
6. Rachidi F. A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models with Special Emphasis to Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, vol. 54, no. 4, pp. 898–911. DOI: 10.1109/TEMPC.2011.2181519
7. Borghetti A., Nucci C. A., Paolone M. An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 684–692. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.881463
8. Rakov V. A., Uman M. A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003. DOI: 10.1017/CBO9781107340886

9. Heidler F. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung. *Proceedings of the 18th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Munich, 1985, pp. 63–66.
10. Furgał J. Influence of Lightning Current Model on Simulations of Overvoltages in High Voltage Overhead Transmission Systems, *Energies*, 2020, vol. 13, no. 2, article 296. DOI: 10.3390/en13020296
11. Paolone M., et al. Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 423–431. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.8201
12. Malcolm N., et al. 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. 1305–1315. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.046
13. Zanetta L.C. Jr. Evaluation of Line Surge Arrester Failure Rate for Multipulse Lightning Stresses, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, vol. 18, no. 3, pp. 796–801. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.813862
14. Johari D., et al. Features of the First and the Subsequent Return Strokes in Positive Ground Flashes Based on Electric Field Measurements, *Electric Power Systems Research*, 2017. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.04.031
15. Ma Y., et al. Lightning Current Distribution of the First and Subsequent Strokes Based on the Lightning Location System: Survey in Yunnan Power Grid, *Atmosphere*, 2025. DOI: 10.3390/atmos16010015

Received: April 01, 2026

Accepted: May 18, 2026

Author's information:

Alexandr D. SOLOV'YOV— Postgraduate Student; shura.solovyov.01@mail.ru