

УДК 656.25 + 621.316.9 + 621.315.1

## Методы защиты объектов железнодорожной автоматики и телемеханики от ударов молнии

**А. Д. Соловьёв**

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

**Для цитирования:** Соловьёв А. Д. Методы защиты объектов железнодорожной автоматики и телемеханики от ударов молнии // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 288–298. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-288-298

### Аннотация

**Цель:** выполнить анализ современных методов молниезащиты зданий и высоковольтных линий 6–10 кВ, питающих устройства железнодорожной автоматики и телемеханики, и оценить их применимость с учетом типовых сценариев грозовых воздействий. Обосновать необходимость комплексной защиты вводов питания. **Методы:** проведен аналитический обзор научных публикаций, нормативных документов и эксплуатационных данных. Выполнена классификация внешних и внутренних систем молниезащиты, а также средств повышения грозостойкости высоковольтных линий. Сопоставлены принципы действия защитных устройств с основными сценариями воздействия молнии: прямым ударом, ударом в опору и близким разрядом с электромагнитной индукцией. **Результаты:** показано, что эффективность традиционных методов защиты зависит от условий эксплуатации и не может обеспечиваться изолированным применением отдельных средств. Выявлены ограничения использования грозозащитных тросов и установки ограничителей перенапряжений только на вводе питания. Обоснована необходимость учета волновых процессов в линии при выборе конфигурации защитных устройств и формирования защищенных подходов к объектам железнодорожной автоматики и телемеханики. **Практическая значимость:** реализация предложенного подхода позволяет снизить уровень импульсных перенапряжений на вводах питания и повысить надежность функционирования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

**Ключевые слова:** молния, внешняя молниезащита, внутренняя молниезащита, средства защиты, молниезащита высоковольтных линий, железнодорожная автоматика и телемеханика

### Введение

Удары молнии остаются одним из наиболее опасных природных факторов, воздействующих на промышленные и инфраструктурные объекты. Помимо прямых ударов, существенный ущерб обусловлен импульсными перенапряжениями (ПН) и электромагнитными наводками, приводящими к пробоям изоляции, деградации компонентов и отказам аппаратуры [1]. По данным международных наблюдений, ежегодные потери от грозовых воздействий исчисляются сотнями тысяч по-

вреждений и значительными экономическими затратами [2–5].

Для железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) проблема грозостойкости имеет особую значимость, поскольку отказ устройств может повлиять на безопасность движения поездов. Анализ эксплуатационных данных за 2014–2024 годы подтверждает высокую чувствительность систем ЖАТ к атмосферным ПН [6].

Несмотря на развитие методов молниезащиты и наличие нормативной базы, обеспечение

требуемого уровня защиты питающих воздушных линий 6–10 кВ и вводов электропитания остается сложной инженерной задачей.

### Молниезащита зданий

В современной практике молниезащиту зданий подразделяют на внешнюю и внутреннюю<sup>1</sup>. Внешняя система предназначена для перехвата прямого удара молнии и отвода тока в землю, внутренняя — для ограничения импульсных ПН и электромагнитных воздействий при прямых и близких разрядах.

Внешняя молниезащита включает молниеприемник, токоотвод и заземляющее устройство. Наиболее вариативным элементом является молниеприемник, выбор которого определяется геометрией объекта и требуемым уровнем защиты<sup>2</sup>.

Классическим решением является стержневой молниеприемник (рис. 1) [7]. Его зона защиты определяется высотой установки, что ограничивает применение для объектов сложной формы. Для проектирования зон защиты используют метод катящейся сферы (МКС) и метод защитного угла<sup>3</sup>. МКС основан на моделировании сферы заданного радиуса, обкатывающей объект; метод защитного угла представляет собой упрощенную геометрическую интерпретацию. Оба метода имеют ограничения при защите протяженных и сложных сооружений [8].

Сетчатый молниеприемник реализует принцип работы клетки Фарадея и формирует практически сплошную защитную поверхность,

обеспечивая выравнивание потенциалов (рис. 2) [9]. Он предпочтителен для крупных объектов ЖАТ (посты ЭЦ, ДЦ), однако отличается большей трудоемкостью и стоимостью.

Тросовый молниеприемник представляет собой проводник, размещенный над защищаемым объектом [10]. Он формирует широкую зону защиты и эффективен для распределенных и линейных сооружений, но требует повышенной механической прочности и регулярного обслуживания (рис. 3).

На практике часто применяют комбинированные схемы, сочетающие сетчатые и стержневые элементы.

Отдельно следует отметить активные молниеприемники (АМП), принцип которых основан на ранней инициализации восходящего лидера [11]. В лабораторных исследованиях действительно зафиксировано некоторое уменьшение времени инициирования восходящего лидера по сравнению с традиционными решениями [12]. Однако анализ экспериментальных данных показывает, что величина этого выигрыша во времени невелика и не приводит к статистически подтвержденному расширению зоны защиты в реальных условиях грозовой обстановки. Лабораторные

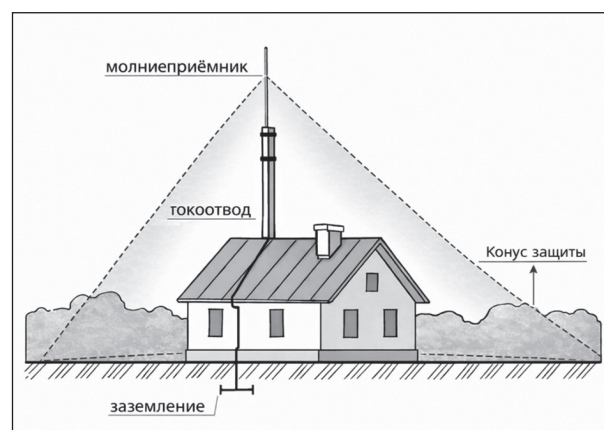
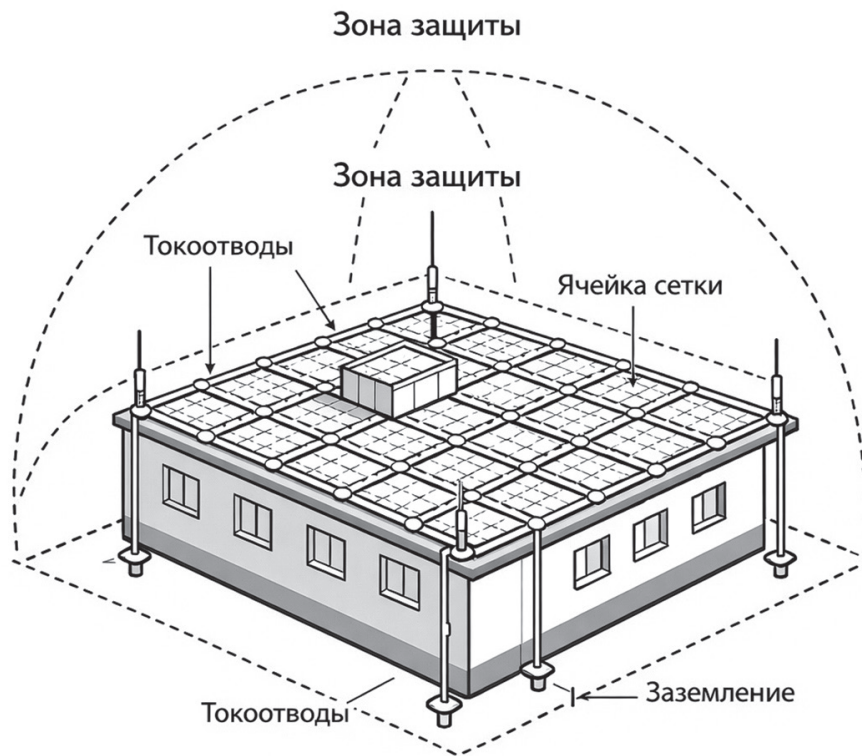


Рис. 1. Молниезащита со стержневым молниеприемником

<sup>1</sup> Версия стандарта от 1978 года. DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3): 2011-10. Blitzschutz. Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen. Norm. Berlin: VDE VERLAG, 2011.

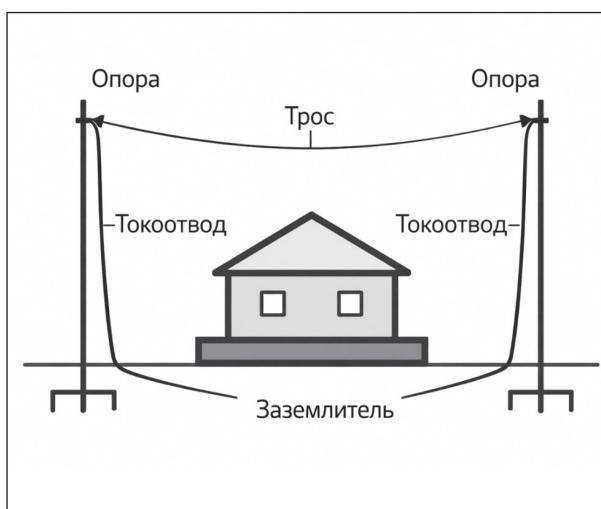
<sup>2</sup> IEC 62305-3:2024. Protection against Lightning. Part 3.

<sup>3</sup> IEEE Std 998-2002. IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations. New York: IEEE, 2002.



**Рис. 2.** Молниезащита с сетчатым молниеприемником

установки не воспроизводят пространственно-временную структуру атмосферного электрического поля и стохастический характер разви-



**Рис. 3.** Молниезащита с тросовым молниеприемником

тия лидеров, что ограничивает применимость результатов к натурным условиям.

Результаты полевых испытаний также не демонстрируют устойчивого увеличения радиуса защиты. В ряде случаев зафиксировано существенное расхождение между заявленными и фактическими характеристиками АМП [13, 14]. При этом в большинстве стран применение АМП либо не регламентировано национальными стандартами, либо прямо не признается действующей нормативной базой, что отражает отсутствие научного консенсуса относительно их эффективности. В связи с этим использование АМП для устройств ЖАТ представляется недостаточно обоснованным.

В таблице показано сравнение методов молниезащиты, описанных выше, с оценкой возможности применения их для защиты различных объектов ЖАТ.

ТАБЛИЦА. Сравнительная оценка методов молниезащиты

Метод	Принцип действия	Эффективность	Особенности применения	Для ЖАТ
Стержневой	Перехват прямого удара	Средняя	Простота, низкая стоимость	Компактные объекты, транспортабельные модули
Сетчатый	Эквипотенциальная поверхность	Высокая	Высокая трудоемкость	Крупные объекты, посты ЭЦ
Тросовый	Экранирование зон	Высокая	Повышенные механические требования	Условно нет
Активный	Ранняя инициализация лидера молнии	Неоднозначная	Ограниченная верификация	Нет

### Методы защиты высоковольтных линий

Методы защиты ВЛ 6–10 кВ, питающих устройства ЖАТ, целесообразно рассматривать на примере вводов питания релейных шкафов (РШ), поскольку именно вводы являются наиболее уязвимым элементом системы «линия — объект». Импульсные ПН, распространяющиеся по линии при ударе молнии, непосредственно воздействуют на оборудование через ввод.

Классическим средством молниезащиты ВЛ является грозозащитный трос, подвешиваемый над фазными проводами [15]. Он предназначен для перехвата прямого удара и отвода тока в землю через опоры. Эффективность определяется геометрией экранирования и качеством заземления. Несмотря на предложения применения троса для защиты вводов питания ЖАТ [16], его использование связано с конструктивными и экономическими ограничениями (усиление опор, увеличение ветровой нагрузки, обслуживание). На рис. 4 показано применение грозозащитного троса для ввода питания в РШ. Поэтому тросовую защиту целесообразно рассматривать как локальную меру на участках с повышенной грозовой активностью.

Более распространенным методом повышения грозостойкости является применение

ограничителей перенапряжений (ОПН) [17]. Обычно ОПН устанавливаются у вводов питания, однако при интенсивных грозовых воздействиях этого может быть недостаточно из-за волновых процессов и переотражений на линии. Установка ОПН на каждой опоре экономически нецелесообразна, поэтому более рациональным является селективное размещение ОПН на наиболее неблагоприятных участках и у ввода. Выбор мест установки должен основываться на расчетной оценке распространения ПН, что требует применения математических моделей ВЛ с учетом параметров

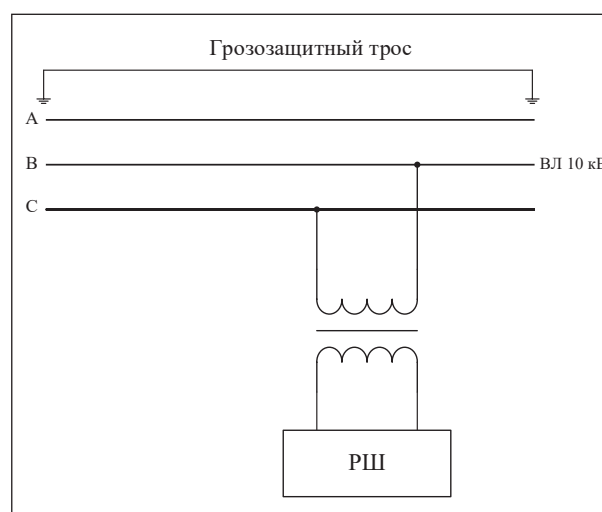


Рис. 4. Защиты ввода питания устройств ЖАТ при помощи грозозащитного троса

линии и характеристик средств защиты. Пример защиты вводов питания РШ с использованием ОПН приведен на рис. 5.

Помимо ОПН, для повышения грозостойкости ВЛ рассматривается ряд специализированных высоковольтных средств защиты, которые могут применяться для формирования защищенных подходов к вводам питания устройств ЖАТ (в сочетании с ОПН на вводе), одним из таких устройств являются мультикамерные разрядники (МКР) [18]. Принцип действия МКР отличается от ОПН: гашение электрической дуги при грозовом воздействии происходит в многокамерной системе с большим числом воздушных промежутков,

что способствует эффективному охлаждению и дроблению дугового канала. К важным эксплуатационным особенностям относится то, что энергия импульса в значительной степени рассеивается вне основного конструктивного объема, благодаря чему защитные свойства устройства могут сохраняться после единичных воздействий. Производители МКР предлагают использовать их для защиты вводов питания (пример приведен на рис. 6). Применение МКР в задачах ЖАТ целесообразно рассматривать как дополнение к ОПН на вводе, однако для корректного выбора схемы включения и мест размещения требуется расчетная проверка эффективности (моделирование

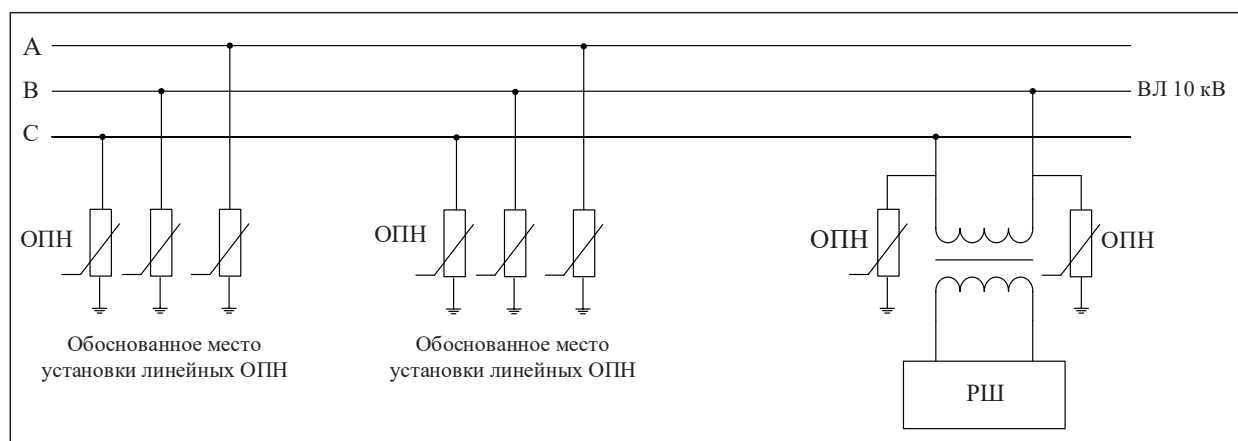


Рис. 5. Защита вводов питания устройств ЖАТ при помощи ОПН

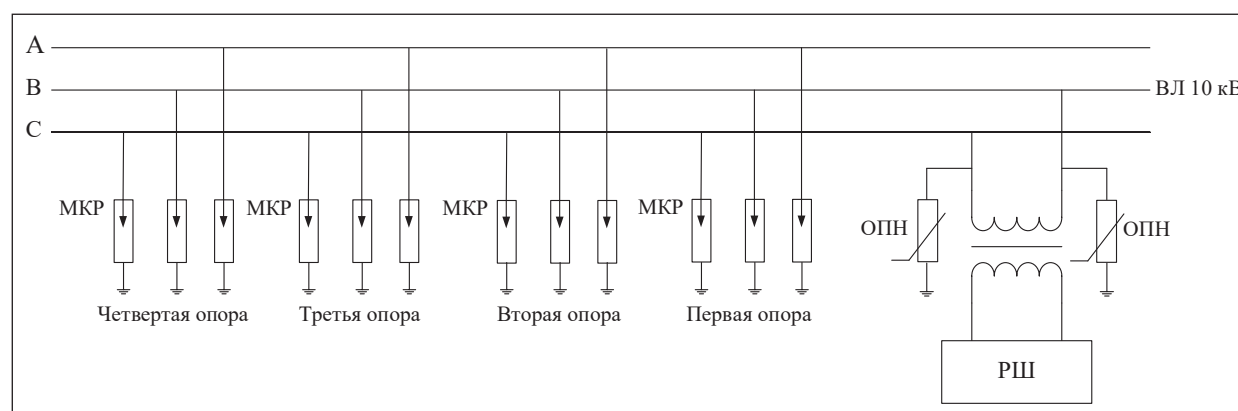


Рис. 6. Защита вводов питания устройств ЖАТ при помощи МКР

грозового воздействия на конкретной линии и объекте).

Также интерес вызывают активные дугогасящие искровые промежутки (АДИП). АДИП относятся к классу устройств, в которых после пробоя и возникновения дуги формируется газовый поток в дугогасящей камере, резко охлаждающий и удлиняющий дуговой канал, что приводит к быстрой деионизации и гашению дуги [19]. Для объектов ЖАТ АДИП целесообразно рассматривать как дополнительное средство в составе комплексной защиты (например, совместно с ОПН у вводов питания), при этом требуются экспериментальные подтверждения эффективности для типовых схем, питающих ВЛ 10 кВ.

Особый интерес вызывают средства защиты под названием «триггерные дуговые промежутки» (ТДП). Данное устройство представляет собой воздушный (газовый) искровой промежуток, применяемый для практически мгновенного пробоя при возникновении ПН с целью отвода тока молнии в землю до момента, когда ПН достигнет уровня перекрытия изоляции.

В отличие от базовых искровых промежутков ТДП принудительно вызывает дугу с помощью триггерного модуля, то есть реализуется принцип раннего срабатывания. Практический интерес к ТДП связан с потенциально меньшей зависимостью эффективности от сопротивления заземления, что особенно важно для линий на участках со сложными грунтовыми условиями. Для внедрения ТДП в схемы защиты питающих линий ЖАТ также необходимы расчетные и/или натурные исследования, подтверждающие снижение уровня перенапряжений и отсутствие нежелательных режимов, например устойчивого дугового процесса.

Рассмотрим типовые воздействия ударов молнии на ВЛ, питающие устройства ЖАТ. На основе обобщения литературных источни-

ков [20–25] можно выделить наиболее характерные сценарии воздействия молнии на ВЛ:

1. Прямой удар молнии в фазные провода ВЛ. Сопровождается введением большого импульсного тока в линии и формированием бегущих волн ПН.

2. Удар молнии в опору ВЛ или в заземляющее устройство. В этом случае формируется ПН по причине подъема потенциала опоры и устройств заземления, а также из-за электромагнитной связи между опорой и фазными проводами.

3. Удар молнии вблизи ВЛ. В данном случае основным воздействием является электромагнитная индукция (ЭМИ), которая приводит к появлению наведенных ПН в фазных проводах.

Данные сценарии отличаются формой и уровнем ПН, соответственно, и требованиями к средствам защиты, что делает универсальные решения молниезащиты малоэффективными.

Сопоставление рассмотренных сценариев с применяемыми средствами защиты показывает следующее: установка ОПН лишь на вводе питания качественно снижает амплитуду ПН в момент прихода импульса, однако неэффективно предотвращает ПН, связанные с переотражениями волн на линии.

Использование грозозащитных тросов снижает вероятность прямого удара молнии в фазные провода, но практически не влияет на наведенные ПН, возникающие при ударах в опоры ВЛ. Кроме того, экономические и эксплуатационные ограничения существенно сужают область их применения.

Использование дополнительных средств защиты на линии позволяет перераспределить энергию удара молнии и снизить уровень ПН, однако эффективность таких решений существенно зависит от места установки и правильной координации с ОПН на вводе питания.

Результаты анализа позволяют обосновать необходимость организации так называемых защищенных подходов к вводу питания устройств ЖАТ. Под защищенным подходом понимается участок ВЛ, на котором реализуется поэтапное ограничение атмосферных ПН за счет селективного размещения средств защиты, обеспечивающее снижение как амплитуды, так и энергии ПН, достигающих вводов питания. В отличие от защиты только на вводе защищенный подход учитывает волновые процессы в ВЛ, а также снижает зависимость эффективности защиты от параметров заземления.

### Заключение

Проведенный анализ показал, что для объектов ЖАТ ключевыми факторами эффективности молниезащиты являются повышение грозостойкости питающих воздушных линий 10 кВ и корректная организация подходов к вводам электропитания. Наибольший ущерб связан с импульсными ПН, распространяющимися по линии, и сопутствующими электромагнитными воздействиями.

Установлено, что защита только на вводе питания в ряде случаев недостаточна из-за волновых процессов, переотражений и влияния параметров заземления. Применение грозозащитных тросов ограничено конструктивными и экономическими факторами и может рассматриваться преимущественно как локальное решение. Обоснована целесообразность формирования защищенных подходов, предусматривающих селективное размещение средств защиты на линии и у ввода. Такой подход обеспечивает снижение амплитуды и энергии перенапряжений и уменьшает зависимость эффективности защиты от характеристик линии и заземления.

Молниезащита зданий остается необходимым элементом обеспечения грозостойкости,

однако не может рассматриваться как достаточная мера без одновременного повышения устойчивости питающих ВЛ.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на развитие и верификацию расчетных моделей воздействия молнии на ВЛ 10 кВ с учетом волновых процессов и параметров линии, что позволит перейти к обоснованному проектированию систем молниезащиты и снижению отказов устройств ЖАТ при экономически оправданных затратах.

### Список источников

1. Rakov V. A., Uman M. A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge. New York: Cambridge University Press, 2003. 687 p. DOI: 10.1017/CBO9781107340886
2. NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). Storm Events Database. Интерфейс поиска и просмотра записей о метеорологических событиях, включая Lightning. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/stormevents/> (дата обращения: 20.12.2025).
3. Insurance Information Institute (Triple-I). *Facts + Statistics: Lightning*. Homeowners Insurance Claims and Payout for Lightning Losses, 2017–2024. URL: <https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-lightning> (дата обращения: 20.12.2025).
4. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV). *Fallzahl auf Rekordtief, dennoch höhere Schäden. Blitzbilanz, 2020–2024*. Medieninformation. URL: <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/fallzahl-auf-rekordtief-dennoch-hoehere-schaeden-69086> (дата обращения: 20.12.2025).
5. General Insurance Rating Organization of Japan (GIROJ). *Overview of Fire Insurance and Earthquake Insurance: FY 2024 Edition (FY 2023 Statistics)*, 2025. URL: [https://www.giroj.or.jp/publication/outline\\_k/k\\_2024.pdf](https://www.giroj.or.jp/publication/outline_k/k_2024.pdf) (дата обращения: 20.12.2025).
6. 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

7. Rakov V. A. Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building. Part II: Numerical Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. Vol. 23, no. 4. Pp. 2447–2455. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923075

8. Rakov V. A. Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection // Journal of Lightning Research. 2012. Vol. 4.

9. Arévalo L., Cooray V. ‘The Mesh Method’ in Lightning Protection Standards — Revisited // Journal of Electrostatics. 2010. Vol. 68, iss. 4. Pp. 311–314. DOI: 10.1016/j.elstat.2010.03.003

10. Colon J. L. Lightning Protection and Instrumentation at Kennedy Space Center // Proceedings of the Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI’2005) “Advances in Engineering and Technology: A Global Perspective”. Cartagena de Indias, Colombia, 8–10 June 2005. No. 82. Pp. 1–11.

11. Tests of the “Early Streamer Emission” Principle for Protection Against Lightning / N. L. Allen, K. J. Cornick, D. C. Faircloth, C. M. Kouzis // IEE Proceedings — Science, Measurement and Technology. 1998. Vol. 145, no. 5. Pp. 200–206. DOI: 10.1049/ip-smt:19982209

12. Van Brunt R. J., Nelson T. L., Stricklett K. L. Early Streamer Emission Lightning Protection Systems: an Overview // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2000. Vol. 16, no. 1. Pp. 5–24. DOI: 10.1109/57.817418

13. Experimental Demonstration of the Effectiveness of an Early Streamer Emission Air Terminal Versus a Franklin Rod / L. Pecastaing [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22, no. 2. Pp. 789–798. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004629

14. The Bell Tower Incident at Sigolsheim: Investigation Report on the Lightning Strike to the

Church Tower Equipped with an ESE Air Terminal. Technical report. France, Sigolsheim, 1996.

15. Armstrong H. R., Whitehead E. R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1968. Vol. PAS-87, no. 1. Pp. 270–281.

16. 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.

17. Lightning Protection of Overhead Distribution Lines Installed on High Resistivity Soil / J. O. S. Paulino [et al.] // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 209. P. 107952. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107952

18. Belskii R. A., Frolov V. Ya., Podporkin G. V. Electric Strength of Arrester for Lightning Shielding of 6–35 kV Transmission Line with Lightning Overvoltage // Journal of Mining Institute. 2018. Vol. 232. Pp. 401–406. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.401

19. Wang J.-F., Wu D. Development of an Arc-Extinguishing Lightning Protection Gap for 35 kV Overhead Power Lines // IET Generation, Transmission & Distribution, 2017. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0377

20. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines / C. A. Nucci [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1993. Vol. 35, no. 1. Pp. 75–86. DOI: 10.1109/15.219546

21. A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models with Special Emphasis on Lightning-Induced Voltages / F. Rachidi [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1997. Vol. 39, no. 2. Pp. 65–89. DOI: 10.1109/15.581994

22. Grcev L., Popov M. On High-Frequency Behavior of Grounding Systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20, no. 2. Pp. 1598–1606. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.839200

23. Visacro S., Soares A. Harmonic Analysis of Grounding Systems Exposed to Lightning Currents // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20, no. 1. Pp. 570–576. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.832347

24. Andreotti A., Falcone U., Verolino L. Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Power Lines: Influence of the Strike Location // Electric Power Systems Research. 2010. Vol. 80, no. 6. Pp. 682–689. DOI: 10.1016/j.epsr.2009.11.003

25. Cooray V. The Lightning Flash. London: Institution of Engineering and Technology, 2014. 744 p.

Дата поступления: 20.02.2026

Решение о публикации: 10.04.2026

**Контактная информация:**

СОЛОВЬЁВ Александр Дмитриевич – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», инженер отдела учебной работы передовой инженерной школы «Интегрированные системы комплексной распределенной архитектуры»; Shura.Solovyov.01@mail.ru

## Methods for Protecting Railway Automation and Remote Control Facilities from 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. Methods for Protecting Railway Automation and Remote Control Facilities Against Lightning Strikes // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 288–298. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-288-298 (In Russian)*

### Abstract

**Objective:** to analyze modern lightning protection methods for buildings and 6–10 kV overhead lines supplying railway automation and remote control (ЖАТ) systems, and to assess their applicability considering typical lightning impact scenarios. To substantiate the necessity of an integrated approach to protecting power supply inputs. **Methods:** an analytical review of scientific publications, regulatory documents, and operational data was conducted. External and internal lightning protection systems, as well as methods for improving the lightning performance of overhead lines, were classified. The operating principles of protective devices were compared with the main lightning impact scenarios, including direct strikes to phase conductors, strikes to poles or grounding systems, and nearby strikes causing electromagnetic induction. **Results:** it is shown that the effectiveness of conventional protection methods strongly depends on operating conditions and cannot be ensured by isolated application of individual measures. Limitations of shield wires and the installation of surge arresters only at power supply inputs are identified. The necessity of accounting for traveling wave processes in overhead lines when selecting protective device configurations and implementing “protected approaches” to railway automation facilities is substantiated. **Practical significance:** the proposed approach reduces impulse overvoltages at power supply inputs and improves the reliability of railway automation and remote control systems.

**Keywords:** lightning, external lightning protection, internal lightning protection, protective devices, lightning protection of high-voltage lines, railway automation and remote control

## References

1. Rakov V. A., Uman M. A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge. New York: Cambridge University Press, 2003, 687 p. ISBN 0-521-58327-6. DOI: 10.1017/CBO9781107340886
2. NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). Storm Events Database. The Interface for Searching and Viewing Records of Meteorological Events, Including “Lightning”. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/stormevents/> (accessed: December 12, 2025).
3. Insurance Information Institute (Triple-I). Facts + Statistics: Lightning. Homeowners Insurance Claims And Payout for Lightning Losses, 2017–2024. URL: <https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-lightning> (accessed: December 12, 2025).
4. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV). Fallzahl auf Rekordtief, Dennoch Höhere Schäden. Blitzbilanz, 2020–2024. Medieninformation. URL: <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/fallzahl-auf-rekordtief-dennoch-hoehere-schaeden-69086> (accessed: December 12, 2025).
5. General Insurance Rating Organization of Japan (GIROJ). Overview of Fire Insurance and Earthquake Insurance: FY 2024 Edition (FY 2023 Statistics). Published: April 2025. URL: [https://www.giroj.or.jp/publication/outline\\_k/k\\_2024.pdf](https://www.giroj.or.jp/publication/outline_k/k_2024.pdf) (accessed: December 12, 2025).
6. Solov'yov A. D., Manakov A. D. Analiz vozdeystviya atmosferykh perenapryazhenij na ustrojstva zhelezodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Analysis of the Effects 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)
7. Rakov V. A. Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building. Part II: Numerical Modeling, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 2447–2455. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923075
8. Rakov V. A. Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection, *Journal of Lightning Research*, 2012, vol. 4.
9. Arévalo L., Cooray V. “The Mesh Method” in Lightning Protection Standards — Revisited, *Journal of Electrostatics*, 2010, vol. 68, iss. 4, pp. 311–314. DOI: 10.1016/j.elstat.2010.03.003
10. Colon J. L. Lightning Protection and Instrumentation at Kennedy Space Center, *Proceedings of the Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2005) “Advances in Engineering and Technology: A Global Perspective”*. Cartagena de Indias, Colombia, 8–10 June 2005, no. 82, pp. 1–11.
11. Allen N. L., Cornick K. J., Faircloth D. C., Kouzis C. M. Tests of the “Early Streamer Emission” Principle for Protection Against Lightning, *IEE Proceedings — Science, Measurement and Technology*, 1998, vol. 145, no. 5, pp. 200–206. DOI: 10.1049/ip-smt:19982209
12. Van Brunt R. J., Nelson T. L., Stricklett K. L. Early Streamer Emission Lightning Protection Systems: An Overview, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2000, vol. 16, no. 1, pp. 5–24. DOI: 10.1109/57.817418
13. L. Pecastaing, et al. Experimental Demonstration of the Effectiveness of an Early Streamer Emission Air Terminal Versus a Franklin Rod, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 789–798. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004629
14. The Bell Tower Incident at Sigolsheim: Investigation Report on the Lightning Strike to the Church Tower Equipped with an Ese Air Terminal. Technical Report, France, Sigolsheim, 1996.
15. Armstrong H. R., Whitehead E. R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1968, vol. PAS-87, no. 1, pp. 270–281.
16. Manakov A. D., Baluev N. N. Usilenie zashchity vvodov pitaniya ustrojstv zhelezodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki pri blizkikh grozovykh razryadakh

[Strengthening the Protection of Power Inputs for Railway Automation and Telemechanics Devices in Case of Near Lightning Discharges], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]*, 2011, no. 1 (26), pp. 73–80. (In Russian)

17. Paulino J.O.S., et al. Lightning Protection of Overhead Distribution Lines Installed on High Resistivity Soil. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107952

18. Belskii R.A., Frolov V.Ya., Podporokin G.V. Electric Strength of Arrester for Lightning Shielding of 6–35 kV Transmission Line with Lightning Overvoltage, *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 232, pp. 401–406. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.401

19. Wang J.-F., Wu D. Development of an Arc-Extinguishing Lightning Protection Gap for 35 Kv Overhead Power Lines, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0377

20. Nucci C. A., et al. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, vol. 35, no. 1, pp. 75–86. DOI: 10.1109/15.219546

21. Rachidi F., et al. A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models with Special Emphasis on Lightning-Induced Voltages, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1997, vol. 39, no. 2, pp. 65–89. DOI: 10.1109/15.581994

22. Grcev L., Popov M. On High-Frequency Behavior of Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, no. 2, pp. 1598–1606. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.839200

23. Visacro S., Soares A. Harmonic Analysis of Grounding Systems Exposed to Lightning Currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, no. 1, pp. 570–576. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.832347

24. Andreotti A., Falcone U., Verolino L. Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Power Lines: Influence of the Strike Location, *Electric Power Systems Research*, 2010, vol. 80, no. 6, pp. 682–689. DOI: 10.1016/j.epsr.2009.11.003

25. Cooray V. *The Lightning Flash*. London, Institution of Engineering and Technology, 2014, 744 p. ISBN 978-1-84919-438-5.

Received: February 20, 2026

Accepted: April 10, 2026

**Author's information:**

Alexander D. SOLOV'YOV — Postgraduate Student of the Department “Automation and Telemechanics on Railways”, Engineer of the Department of Educational Work, Advanced Engineering School Integrated Systems of Complex Distributed Architecture; Shura.Solovyov.01@mail.ru