

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА С ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНОМ К ПРЯМОМУ УДАРУ МОЛНИИ

С. Д. ДУБИЦКИЙ¹, Россия, Н. В. КОРОВКИН², Россия, Е. А. БАБКОВ³, Россия

¹ООО «Тор», ²Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,

³ООО «СтройПроектЭнергоСвязь», e-mail: simon@tor.ru

Аннотация. Форсированное строительство магистральных цифровых коммуникаций заставляет использовать для прокладки линий связи существующую инфраструктуру. Для вновь строящихся и реконструируемых ЛЭП наиболее надежным способом является встраивание оптического модуля в грозозащитный трос. Возникает необходимость детального анализа термической стойкости оптического грозотроса к прямому удару молнии. В докладе обсуждаются метод и результаты моделирования нестационарного электромагнитного и температурного полей в оптическом грозотросе (ОКГТ). Метод учитывает реальную геометрию кабеля, нелинейные свойства материалов, эффекты вытеснения тока и близости. Обоснован выбор идеализированного импульса тока молнии для целей моделирования и испытаний термической стойкости

Abstract. Today demand of high speed backbone communication lines dictates using of existent transport infrastructure for building the new communication lines. Standard practice is using overhead power lines for mounting optical communication lines. For the new power lines the most popular way is embedding of one or more optical cable into the lightning protection cable. The tolerance of such combined optical overhead protection cable (OPGW) against direct lightning stroke is a subject of this paper. The new method of finite element analysis of coupled transient electromagnetic field and heat transfer phenomena is proposed. The method takes into account the real cable structure, magnetic saturation of steel wires, the skin effect and proximity effect in the OPGW cable. The choice of proper form of the test current pulse is discussed.

Введение: Линии связи и ЛЭП

Одним из перспективных направлений стала в последние годы прокладка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) в существующих и строящихся воздушных линиях электропередачи 1.

Согласно [10] до 80% всех оптических кабелей, со-
вмещенных с воздушными линиями электропередач, монтируется путем встраивания оптического модуля в грозозащитный трос. По тем же данным, в 2006 году, когда началось первое в России сертифицированное производство оптических грозотросов, российские компании закупали до 10–15 тыс. км такого кабеля в год.

Грозотрос может содержать один или несколько встроенных оптических модулей, наружный диаметр которых составляет от 3 до 8 мм. Если в грозотросе имеется один оптический модуль, он располагается по центру, а вокруг него в один или два повива навиваются проволоки, как в обычном грозозащитном тросе. Используются стальные проволоки, плакированные алюминием, либо сочетание стальных проволок с алюминиевыми.

Проблема термической стойкости оптического грозотроса

Основная функция грозотроса - проводить ток короткого замыкания и токи, вызванные атмосферными перенапряжениями – прямыми ударами молнии в трос и наведенными импульсами. Тепловая стойкость ОКГТ должна быть рассчитана так, чтобы не только обеспечить остаточную механическую прочность, но и эффективно отводить тепло от оптического модуля.

Анализ физической картины термической стойкости оптического грозотроса при прямом ударе молнии оказывается относительно сложным по следующим причинам:

- Требуется решение междисциплинарной проблемы с обменом данными между электромагнитной и тепловой задачами.
- Высокая скорость нарастания тока на переднем фронте импульса обуславливает резко выраженный эффект вытеснения тока и эффект близости, что требует тщательного выбора шагов дискретизации в пространстве и во времени.
- Существенный вклад в решение вносят нелинейные магнитные свойства стальных проводников.
- Многопроволочная структура грозозащитного троса требует совместного решения уравнений электромагнитного поля и присоединенной электрической цепи.

Авторам известна лишь одна работа [2], аналитически исследующая распределение токов в упрощенной модельной геометрии без насыщения. Численный анализ распределения плотности тока грозового импульса методом конечных разностей сделан в работе [3], где также использована упрощенная одномерная геометрия из трех соосных цилиндров. Работы тех же авторов, в которых рассматривалась более реалистичная геометрия кабеля, потребовала применения метода конечных элементов [4,5]. Электромагнитное поле здесь рассчитывалось в частотной области, что оправдано для анализа токов короткого замыкания, но неприменимо при расчете импульса от удара молнии и не позволяет учесть насыщение стали.

В качестве инструмента исследования выбрана программа ELCUT [9] (ООО «Тор», Санкт-Петербург), использующая метод конечных элементов (МКЭ).

Форма импульса тока при ударе молнии

Говорить о точной форме и параметрах импульса тока, вызванного прямым ударом молнии можно лишь условно. Тем не менее, для целей испытания и математического моделирования знать форму импульса необходимо. Выбор подходящего математического описания завит от целей моделирования.

Обычно речь идет о стандартном грозовом импульсе 1,2/50 мкс, который описывается как сумма двух затухающих экспонент с разными постоянными времени.

Результаты подробных исследований характеристик импульса тока при наихудшем возможном ударе молнии приведены в техническом меморандуме NASA [6], основные положения которого вошли в рекомендации SAE International [7] – международного общества инженеров автомобильной и аэрокосмической промышленности.

Для испытаний и расчетов термической стойкости при ударе молнии SAE рекомендует идеализированный грозовой импульс тока (рис. 1), состоящий из 4-х компонентов: A, B, C и D (SAE ARP5412):

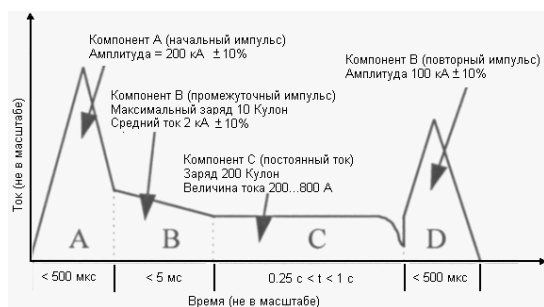


Рис.1. Идеализированный грозовой импульс тока 7. Компоненты А, В, и D описываются двойной экспонентой, компонента С считается постоянной.

В работе [8] обосновывается желательность использования 4-х компонентного модельного импульса тока для расчетов и испытаний оптических грозотросов. Там же указывается на недостаточность применения для оптических грозотросов методов испытаний, разработанных для обычных грозозащитных тросов.

Расчет электромагнитного поля

Целью электромагнитного расчета является выяснение распределения плотности тока по сечению кабеля в зависимости от времени. Расчетная область представляет собой упрощенное поперечное сечение кабеля. На данном этапе предполагается, что магнитное поле не изменяется по длине кабеля, то есть используется плоско-параллельное приближение.

Предположим, что весь ток канала молнии перешел в грозозащитный трос и каким-то образом распределился по его сечению. При этом можно выделить следующие случаи для анализа:

1. Ток распределен по всему поперечному сечению кабеля (характер распределения, существенно неравномерный, остается предметом расчета);
2. Заданный ток распределен по сечению только одной проволоки, а остальные проволоки, соединенные с первой параллельно, играют роль демпфера;
3. Ток распределился по нескольким (двум, трем) соседним проволокам, а остальные проволоки несут обратный ток, играя роль демпфера.

Фотографии характера повреждений кабеля, сделанные по результатам реальных ударов (рис. 2) наводят на мысль, что, по крайней мере, в начальной фазе развития электромагнитного процесса, основная масса тока действительно сосредоточена в одном–двух проводах, ближайших к месту соприкосновения с каналом молнии.



Рис. 2. Разрушение двух проволок оптического грозотроса в результате прямого удара молнии [8]

Для расчетов выбрано самое простое поперечное сечение грозотроса с одним центральным оптическим модулем и шестью стальными проволоками, навитыми в один слой. Отметим, что изложенный метод может быть применен также для значительно более сложных сечений, в том числе с проволоками, плакированными алюминием, с профилированным сердечником и т.п.

Положим для начала, что описанный выше импульс тока распределен по всему сечению троса.

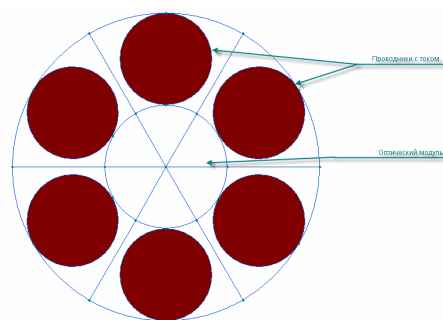


Рис. 3. Все проволоки грозотроса нагружены током молнии.

Источником поля в задаче является наперед известный полный ток провода в функции времени. Полный ток является интегралом от плотности тока по площади сечения провода. Детальное распределение плотности тока в каждый момент времени является предметом расчета.

Картина магнитного поля (распределение плотности тока по сечению) показана на рис. 4. в начальной фазе импульса (вверху) и в районе максимума тока (внизу).

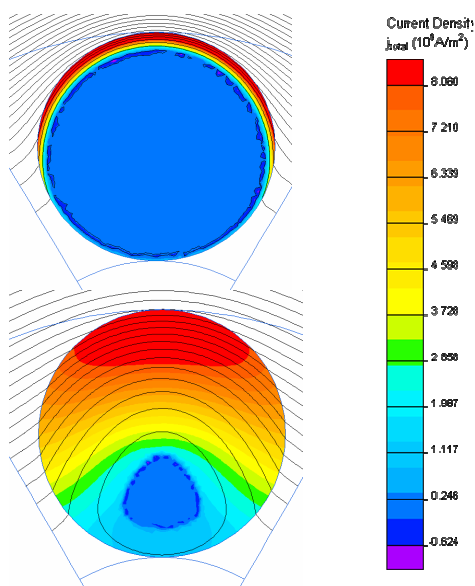


Рис. 4. Картина магнитного поля и плотности тока.

На рис. 4 отчетливо виден постепенный процесс проникновения поля внутрь проводника, начиная с его внешней границы. Несимметричное распределение поля обусловлено эффектом близости соседних проводников, которые не включены в модель непосредственно, но присутствуют в ней благодаря граничным условиям.

Теперь рассмотрим другое крайнее предположение, состоящее в том, что в первые мгновения после удара молнии ток распределяется исключительно по одной из проволок троса, помеченной красным цветом. Остальные проволоки троса играют роль обратного провода. Для учета влияния остальных проводников троса необходимо связать проволоки модели в электрическую схему, как показано на рис. 5.

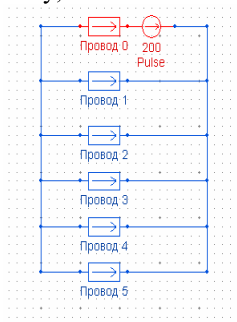


Рис. 5. Электрическая схема соединения проволок троса.

Картина поля для этого случая (рис. 6), как и на рис. 4, приведена для двух характерных моментов времени: в начальной фазе импульса (сверху) и в момент, близкий к максимуму тока (внизу).

Аналогично рассматривается случай, когда ток молнии в начальный момент сосредоточен в нескольких, но не всех проволоках грозозащитного троса.

Расчет температурного поля

Для расчета температурного поля, вызванного протеканием токов в проводниках грозозащитного троса,

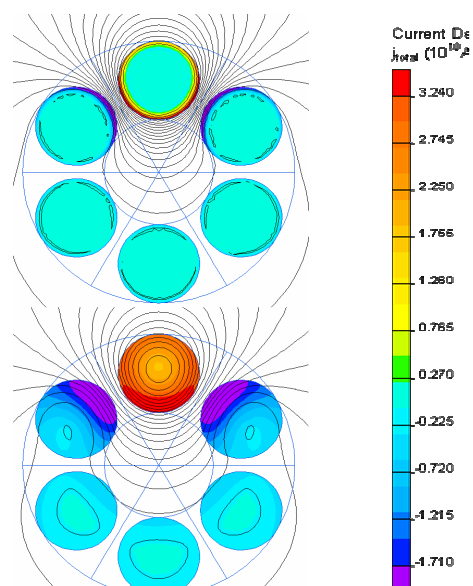
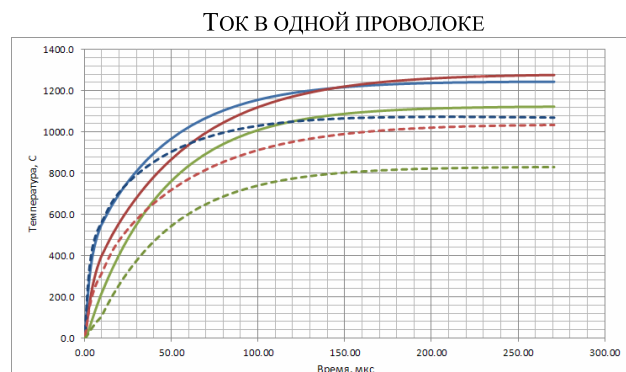


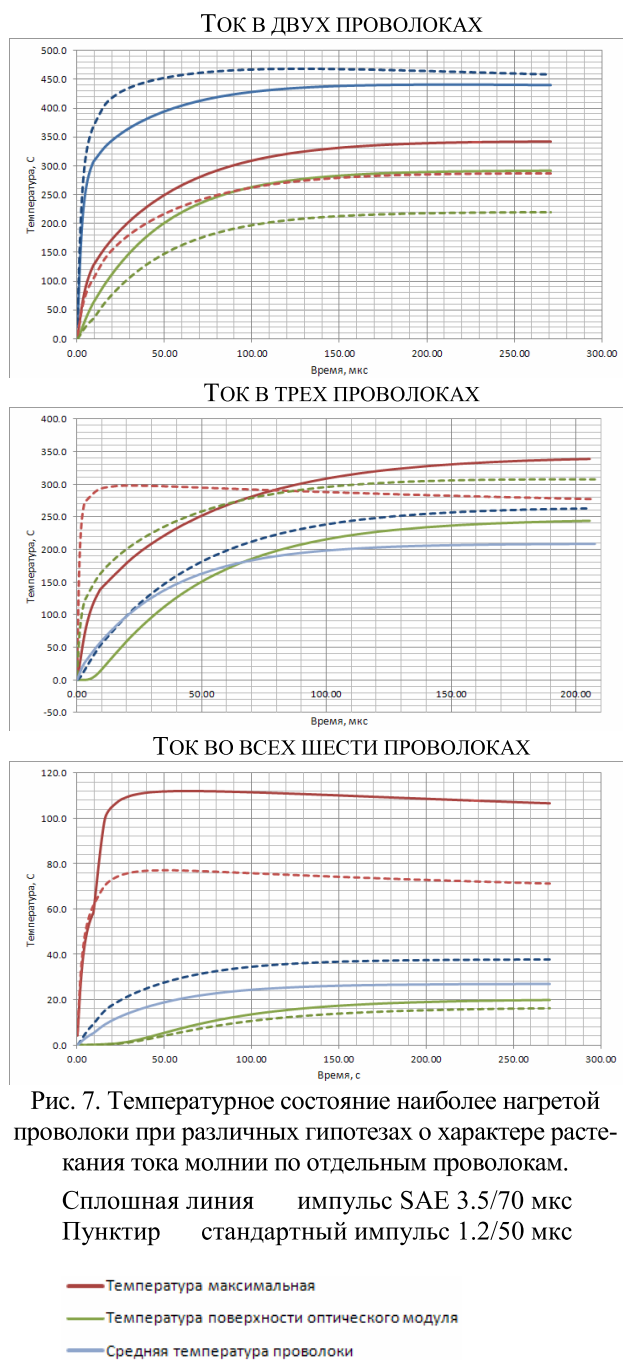
Рис. 6. Картина магнитного поля и плотности тока.

используется нестационарная тепловая задача ELCUT, связанная с соответствующей электромагнитной задачей. Связь между электромагнитной и тепловой задачами состоит в том, что они решаются на одной и той же сетке и с одинаковыми шагами дискретизации по времени. Распределение джоулевых потерь, вычисленное на каждом шаге электромагнитного процесса, служит источником тепла в температурной задаче в соответствующий момент времени.

Расчет температурного поля продолжается и после окончания импульса тока (источника тепла), чтобы смоделировать процесс выравнивания тепла в тросе с последующим остыванием. Шаг по времени на этом этапе расчета выбирается более крупным.

На рис. 7 приведены зависимости температуры от времени для двух характерных точек: вблизи внешней поверхности проволоки (синяя кривая), на поверхности оптического модуля (красная кривая), а также средняя температура наиболее нагретого проводника (зеленая кривая). Расчеты сделаны для стандартного грозового импульса (1,2/50 мкс) и фазы А импульса SAE (3,5/70 мкс). Амплитуды импульсов выбраны одинаковыми и равными 200 кА, согласно рекомендациям SAE.





Из графиков видно, что различие между токовыми импульсами качественно не меняет картину теплового состояния. Импульс SAE имеет более пологий передний фронт, что уменьшает вихревые токи и разогрев на начальном этапе импульса, но более длинный спад, который повышает финальную температуру.

Решающее влияние на температурное состояние троса оказывает принятая гипотеза о распределении тока молнии по проволокам троса. Тем не менее, можно сделать вывод о том, что при наиболее вероятных сценариях (удар молнии, затрагивающий 1-2 проволоки), термическая стойкость кабеля приведенной конструкции оказывается недостаточной.

Выводы

1. Полевой метод анализа электромагнитного и температурного состояния троса при прямом ударе молнии позволяет учесть: реальную форму импульса тока, эффект близости, эффект вытеснения, насыщение стальных проволок.

2. Сравнение стандартного импульса 1,2/50 мкс и импульса 3,5/70 мкс (SAE) показывает, что на температурное состояние проволок влияет как крутизна переднего фронта, так и длина импульса, причем это влияние различно для разных гипотез о распределении тока по проволокам. В целом, обе формы импульса приемлемы для анализа.

3. Численное моделирование демонстрирует, что исследованный кабель простой конструкции не выдерживает прямого удара молнии максимальной силы.

Литература

1. ВОЛС на воздушных линиях электропередачи. – OpticTelecom
<http://www.optictelecom.ru/000000/lib/pdf/hvo-05.pdf>
2. K. Q. da Costa, V. Dmitriev, J. T. Pinho, S. Colle, L. Gonzalez, M. A. Andrade, J. C. V. da Silva, and M. Bedia, "Analytical Model for Calculation of Current Density Distributions Over Cross-section of a Multi-conductor Cable", IWCS/Focus Conference, Providence, USA, (2006).
3. Gomes, K. D. C.; Martins, T. C.; Pinho, J. T.; Dmitriev, V.; Colle, S.; Andrade, M. A.; Silva, J. C. V.; Bédia M. Analysis of the Current Density Distribution in OPGW Cables under Lightning Conditions Using the BOR-FDTD Method. In: 58th IWCS Conference, 2009, Charlotte/USA. Proceedings of 58th IWCS, 2009.
4. K. Q. da Costa, V. Dmitriev, J. T. Pinho, L. Gonzalez, S. Colle, M. A. Andrade, J. C. V. da Silva and M. Bedia, "Numerical Calculation of Current Density Distributions over Cross-Section of a OPGW Cable", 16th International Conference on the Computation of the Electromagnetic Fields, Aachen, Germany (2007).
5. J. T. Pinho, S. Colle, V. Dmitriev, L. Gonzalez, J. N. Scussel, M. A. Andrade, J. C. V. da Silva, M. Bedia A Modified OPGW Cable to Account for Higher Temperature Capacity During Short Circuit and Lightning Events.
6. C.C. Goodlo Lightning protection guidelines for aerospace vehicles. – NASA Marshall Space Flight Center.- MSFC, Alabama 35812
7. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. – SAE International Standard.
8. Chisholm, W.A., J.P. Levine, Pon C.J., Jusevicius M. A.R. Progress in protecting power systems against impulse charge and continuing current effects of lightning flashes. IX International Symposium on Lightning Protection 26th-30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil.
9. ELCUT 5.8 Руководство пользователя. - ООО «Тор», Санкт-Петербург, 2009, www.elcut.ru
10. М. Э. Боксимер, Преимущества оптического кабеля ОКГТ. – Электротехнический рынок № 7-8, 2007, доступен на http://www.elec.ru/articles/kabel_okgt/