

УДК621.762

Вишняков Л.Р., Зубков О.В., Коханий В.А., Коханая И.Н.

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. Украина, г. Киев

## ВЯЗАНО-ПАЯНЫЕ ПРОВОЛОЧНЫЕ СЕТКИ ДЛЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

*Проведён анализ существующих систем молниезащиты в сфере ветроэнергетики. Приведена схема формирования стримеров на внешней непроводящей поверхности лопасти вблизи точки привязки молнии. Приведены зоны воздействия и параметры токов молнии по длине лопасти ветроагрегата. Разработана система молниезащиты лопастей ветровых турбин, состоящая из сетчатого молниеприёмника и сетчатого молниеотвода (шины). Определены преимущества предложенной системы по сравнению с другими системами молниезащиты.*

Ключевые слова: молниезащита; лопасть; удар молнии; токоотвод; стример; молниеприёмник; вязано-паяная сетка; диссипация энергии.

Лопастей современных ветровых турбин — это крупные полые конструкции, изготовленные из стеклопластиков, углепластиков и других композиционных материалов. Надежная эксплуатация ветротурбины может быть под угрозой при повреждении прямым ударом молнии хотя бы одной из её лопастей. Например, пожар ветротурбины в результате удара молнии (рис. 1) в ветрогенератор,



Рис. 1. Пожар ветротурбины в результате удара молнии г. Падерборн, Германия

установленный в районе г. Падерборн (Германия), принес убытки, измеряемые в 1,5 млн. евро.

При прямом ударе молнии в таких конструкциях возникают сильные термические и электрические нагрузки, которые могут вызывать сквозные прожоги и расслоения на значительной площади вокруг места контакта с каналом молнии. Основная проблема состоит в определении точек привязки молнии и безопасном отводе тока молнии, чтобы предотвратить образование дуги внутри лопасти.

Мировые производители ветроагрегатов решают эту проблему, используя различные системы молниеприёмников и токоотводов к заземлению ветрогенератора. Последние монтируются либо на поверхности лопасти, либо внутри неё. Наиболее распространённый метод молниезащиты лопастей заключается в использовании металлических дискретных приёмников (рецепторов), расположенных на вершине лопасти и её боковых поверхностях. Рецепторы подсоединяются к токоотводу, связанному с заземлением ветроагрегата, в виде провода или проводов, которые проходят во внутренней части лопасти (например, вдоль лонжерона конструкции лопасти) [1].

Одним из недостатков этой системы молниезащиты является то, что токоотводы, расположенные внутри лопасти, и дискретные рецепторы на её поверхности формируют стримеры для привязки молнии. Стримеры представляют собой узкие каналы ионизованного газа, возникающие непосредственно перед искровым разрядом. Схематически это показано на рис. 2. Иногда стримеры приводят к пробоям и сильным повреждениям лопасти [2].

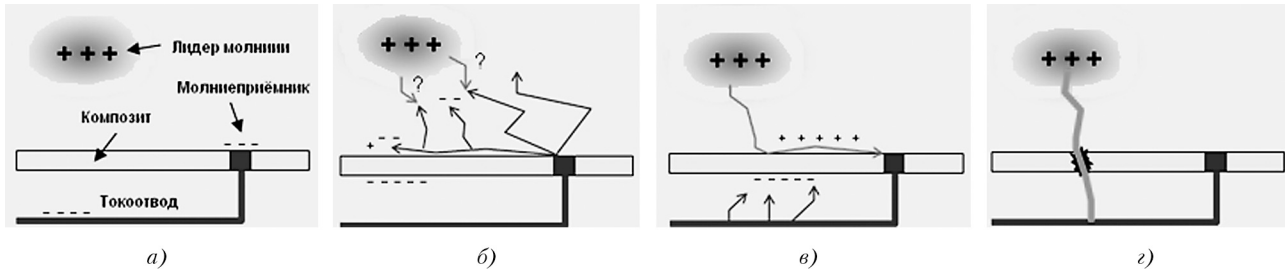


Рис. 2. Формирование стримеров на внешней непроводящей поверхности лопасти вблизи точки привязки молнии

Положительно заряженный лидер молнии вызывает появление отрицательного заряда на заземленной поверхности лопасти (рис. 2, а), при достижении электрического поля величины выше определенного порогового значения происходит ионизация и осаждение отрицательного заряда на внутренней поверхности лопасти (рис. 2, б). Внутренние отрицательные заряды подавляются и вызывают положительные заряды на внешней поверхности лопасти. При этом на внешней поверхности лопасти формируются стримеры, которые направлены от металлического рецептора в сторону положительных зарядов нейтрализуя их, а образовывавшиеся отрицательные стримеры направлены в сторону положительного заряда лидера (рис. 2, в).

Если стример, который сформировался вдоль поверхности лопасти, достигнет лидера молнии, то на поверхности образуется точка привязки молнии, а положительный заряд лидера молнии пройдет близко к поверхности и вызовет появление последующих внутренних разрядов (рис. 2, з).

В результате этих разрядов канал молнии может нанести лопасти термические повреждения, а пробой часто приводит к серьезным повреждениям из-за образования внутренней дуги и расслоений (рис. 2, з).

Для предотвращения возникновения разрушений лопастей иногда используют сегментированные молниезащитные ленты, которые отражают

канал молнии, устремленный к молниеприёмнику [3]. Такие ленты отводят ток молнии, создавая ионизированный канал над поверхностью ленты, и подводят его к приёмнику. Отметим, что введение внешних дискретных лент может изменить аэродинамические показатели лопасти и привести к снижению эффективности ветроагрегата и к повышению уровня шума. Недостатком таких лент также является снижение эффективности молниезащиты при обледенении лопасти [3].

Также нужно отметить, что высокие импульсные токи приводят к появлению сильных магнитных полей. Эти поля могут взаимодействовать со всеми металлическими частями лопасти, такими как изолированные цепи токоотводов, датчики управления, световая сигнализация и т.д., и привести к скачкам напряжения и внутреннему искрообразованию в лопастях ветровых турбин.

Учитывая вышеизложенное, во избежание формирования стримеров и искрообразований от внутренних металлических частей лопасти, целесообразно размещать токоотводы на внешней поверхности лопасти. Это должно предотвратить образование дуги внутри лопасти и её катастрофического разрушения.

Международный стандарт для молниезащиты ветролопастей устанавливает следующие зоны воздействия токов молнии по её длине, рис.3 (показано

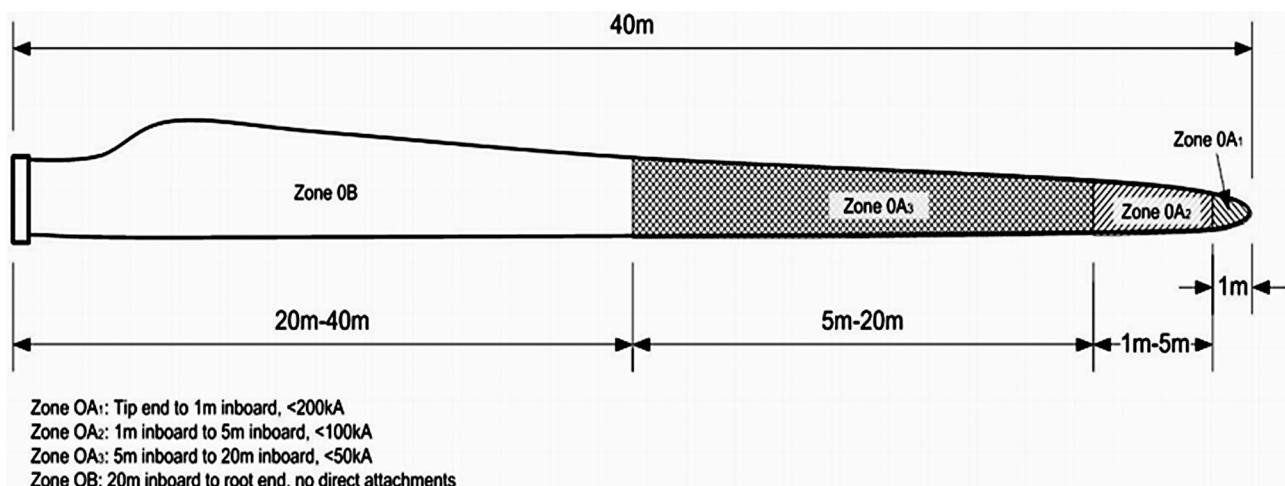


Рис. 3. Разделение лопасти на зоны

Параметры зоны действия молнии в лопастях ветровых турбин

Зона лопасти	Длина зоны, м	Максимальный импульсный ток, кА	Удельная энергия, МДж/Ом	Заряд*, Кл
ОА1	1	200	10	300
ОА2	1–5	100	2,5	150
ОА3	5–20	50	0,63	75

\* Суммарный заряд, протекающий во время максимального импульса тока первого обратного разряда, промежуточного и постоянного токов молнии.

для лопасти длиной 40 м), а в таблице 1 — приведенные параметры воздействия молнии на эти зоны [4].

Одними из внешних токоотводов, используемых в ряде конструкций, являются цельнометаллическая лента фирмы Dehn Германия [5] и проводящая лента с адгезионным слоем фирмы Jomites Дания [6]. Цельнометаллическая непрерывная лента представляет собой медную полоску шириной 20 мм и толщиной 2,5 мм. Недостатками такой ленты является плохая технологичность из-за отсутствия достаточной гибкости при её введении на поверхность композита лопасти за счёт большой толщины, а также плохая адгезия к верхним слоям композита. В процессе эксплуатации длинные лопасти могут изгибаться под сильными потоками ветра [1], а плохая адгезия может привести к отслоению токоотвода от композита и потере прочности лопасти.

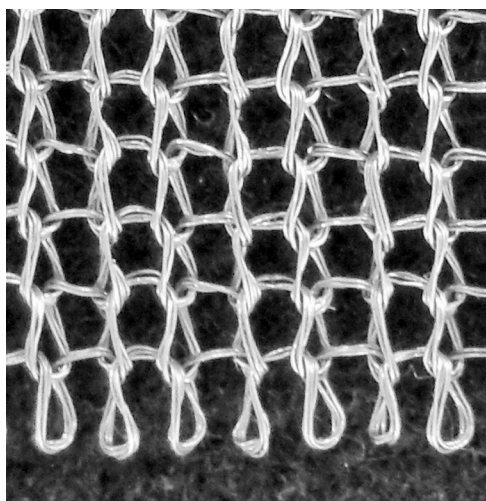
Отметим, что более широкая лента (например, шириной до 200 мм) также не может служить токоотводом всей поверхности лопасти, а надёжная работа такой ленты при обледенении также стоит под вопросом.

Нами была разработана система внешней молниезащиты ветролопастей на основе разработанных

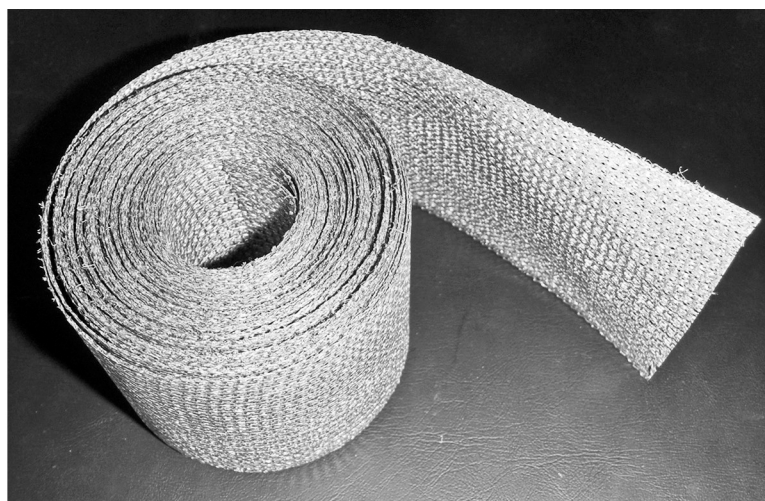
ранее молниезащитных сеток, использованных в авиации [7, 8].

Такие сетки располагаются на внешней поверхности лопасти в качестве молниеприёмника (рис. 4, а), а многослойная сетчатая лента-шина (рис. 4, б) располагается под молниеприёмником также на поверхности лопасти по всей её длине. От молниезащитных сеток, применяемых в самолостроении, они отличаются тем, что изготавливаются вязанием пучка, состоящего из двух и более медных проволок (рис. 4, а). Петли в сетках пропаяются легкоплавким оловянно-свинцовым припоем ПОС-61. Их структура, также как и в авиационных сетках, обладает диссипативными свойствами (проявляющимися в молниеприёмнике) при трансформации и поглощении энергии молнии. Этому способствуют механизмы распайки петель и испарения припоя с поверхности проволок при воздействии Джоулева тепла, сопровождающего удар молнии. Кроме того, механизмами, снижающими разрушающие действия молнии, являются распрямление проволок в петлях трикотажных ячеек и их вытягивание из полимерного связующего.

Сетчатый молниеприёмник необходимо располагать на той части поверхности лопасти, которая



а)



б)

Рис. 4. Рациональная система молниезащиты лопастей ветровых турбин, состоящая из сетчатых: молниеприёмника (а) и молниеввода (б)

по статистике в наибольшей мере подвержена поражению молнией (зоны  $OA_1$ ,  $OA_2$  и  $OA_3$ ). Возможно также расположение такого молниеприёмника на всей поверхности ветролопастей с охватом зоны ОВ. Важно также использовать рациональную конструкцию молниеотвода, как показано на рис. 4б (шины для отвода больших электрических зарядов в землю), который, встраивается в ветролопасть. Его рекомендуется изготавливать из пакета, состоящего из нескольких слоёв медных трикотажных сеток в виде пористой шины, электрически связанной с молниеприёмником. Структура и состав сеток для молниеотвода может совпадать с материалом молниеприёмника, однако сечение молниеотвода должно быть увеличено для пропускания больших токов. Этого и достигают путем увеличения количества слоев сетки в молниеотводящей шине.

Электрическое сопротивление молниезащитных сеток, используемых для молниеприёмников и молниеотводящих шин, в принципе, зависит от материала и диаметра проволок, присутствия легкоплавкого покрытия на поверхности проволок и в местах их контакта в пучке проволок и петлях (табл. 2).

Зависимость удельного электросопротивления сетчатых полотен от их поверхностной плотности (рис. 5) показывает, что путем подбора состава медных проволочных жгутов можно снизить вес сеток при сохранении необходимой проводимости токоотводящих полотен. Таким образом, подбирая состав и структуру вязаных и вязано-паяных сеток, можно повысить молниезащищенность лопастей путем организации диссипации энергии молнии молниеприёмником и эффективного (безопасного) молниеотвода электрических зарядов в землю.

В результате проведенных разрядных испытаний было установлено, что в качестве молниеприёмника в лопастях ветроагрегатов лучше использовать сетку из нескольких медных проволок, диаметром от 0,08 до 0,12 мм. Для надежной защиты необходимо покрыть сеткой ту поверхность лопа-

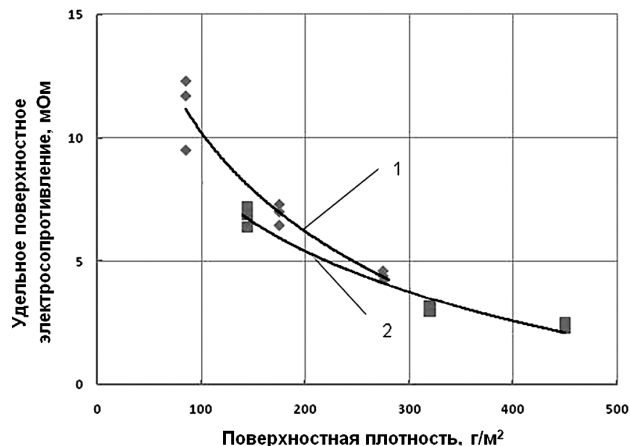


Рис. 5. Зависимость удельного поверхностного электросопротивления сеток от поверхностной плотности: 1 — сетки из проволоки диаметром 0,08 мм (1,2,3 проволоки в пучке); 2 — диаметром 0,12 мм (1,2,3 проволоки в пучке)

сти, для которой существует наибольший риск попадания молнии. Таким образом, при действии молнии сетка создаёт экранирующее воздействие на возникающие электромагнитные поля, а при ударе молнии в лопасть — проявляет диссипативные свойства и переносит заряд по токоотводу к системе заземления ветроагрегата.

Отличительной особенностью разработанного токоотвода от описанных в [5, 6] конструкций является пористая структура и рельефность его поверхности, а также возможность варьирования свойств токоотвода путём изменения количества проволок в пучке сетки и слоёв сеток.

### Выводы

Разработана система молниезащиты лопастей ветроэлектрогенераторов, которая создаёт следующие преимущества по сравнению с существующими системами:

- высокую эластичность за счёт объёмной структуры трикотажной сетки;

Электрическое сопротивление образцов вязано-паяных сеток

Таблица 2

Материал проволоки сетки	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Толщина полотна, мм	Удельное поверхностное электросопротивление полотна, МОм
Латунь (1 нить) Ø 0,1 мм	112,0	0,39	637,5
Медь (1 нить) Ø 0,1 мм	142,0	0,38	9,9
Медь (1 нить) Ø 0,12 мм луженная припоем ПОС-61	163,0	0,42	6,7
Медь (2 нити) Ø 0,12 мм луженная припоем ПОС-61	327,0	0,53	3,3
Медь (3 нити) Ø 0,12 мм луженная припоем ПОС-61	457,0	0,64	2,33



- улучшение адгезии сетчатых элементов молниезащиты к связующему композиционного материала лопасти;
- возможность наформовки сетки на большие участки лопасти (либо на всю её поверхность);
- возможность варьирования проволок в пучке сетки и количества слоёв сеток с целью снижения веса при безопасном отводе заряда молнии в землю.

### Литература

- [1] IEC 61400-24, «Wind turbines - Part 24: Lightning protection», International Electrotechnical Commission, Switzerland, 2010 (Edition 1.0). 153 p.
- [2] Madsen S. F., «Interaction between electrical discharges and materials for wind turbine blades particularly related to lightning protection». Шrsted-DTU, The Technical University of Denmark, Ph.D. Thesis, March 2006, 184 p.
- [3] Design guide for glass fiber reinforced plastic wind turbine blades [Электронный ресурс] [www.wxguardwind.com](http://www.wxguardwind.com)
- [4] Madsen S.F. Proposal of New Zoning Concept Considering Lightning Protection of Wind Turbine Blades. Journal of Lightning Research. 2012, 4, 108-117.
- [5] Lightning Protection [Электронный ресурс] [www.dehn.de](http://www.dehn.de)
- [6] Lightning protection of a wind turbine blade [Электронный ресурс] <http://www.jomitek.dk/index.php?page=liprotection>
- [7] Вишняков Л.Р. Вязано-паяные медные сетки и углеродные наноструктурные частицы для молниезащиты композиционных материалов: опыт авиастроения для ветроэнергетики. // Технологические системы. — 2013. — №2. — С. 22-27.
- [8] Вишняков Л.Р., Чернявский И.И., Зубков О.В. Исследование возможности молниезащиты полимерных композиционных материалов, армированных медной вязаной сеткой. // Вестник инженерной академии Украины. — 2012. — № 2. — С. 143-148.

*Vishnyakov L.R., Zubkov O.V., Kokhaniy V.O., Kokhana I.M.*

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine. Ukraine, Kiev

### KNITTED SOLDERED WIRE MESHES FOR LIGHTNING PROTECTION OF WIND UNIT GENERATOR BLADES

*The lightning protection systems existing in the wind power industry were analyzed. The scheme of streamer formation upon the external non-conductive blade surface, near the attachment point, is presented. The zones of action and parameters of lightning currents along the wind unit generator blade are identified. A lightning protection system for wind unit generator blades consisting of a meshed lightning receiver and meshed lightning conductor (bus rod) is developed. Advantages of the proposed system are defined as being over other lightning protection systems.*

*Keywords:* lightning protection; blade; lightning strike; lightning conductor; streamer; lightning receiver; knitted soldered mesh; energy dissipation.

### References

- [1] IEC 61400-24, «Wind turbines - Part 24: Lightning protection», International Electrotechnical Commission, Switzerland, 2010 (Edition 1.0). 153 p.
- [2] Madsen S. F. «Interaction between electrical discharges and materials for wind turbine blades particularly related to lightning protection». Шrsted-DTU, The Technical University of Denmark, Ph.D. Thesis, March 2006, 184 p.
- [3] Design guide for glass fiber reinforced plastic wind turbine blades [Electronic resource] [www.wxguardwind.com](http://www.wxguardwind.com)
- [4] Madsen S.F. Proposal of New Zoning Concept Considering Lightning Protection of Wind Turbine Blades. // Journal of Lightning Research. — 2012. — No. 4. — P. 108-117.
- [5] Lightning Protection [Electronic resource] [www.dehn.de](http://www.dehn.de)
- [6] Lightning protection of a wind turbine blade [Electronic resource] <http://www.jomitek.dk/index.php?page=liprotection>

- [7] Vishnyakov L.R. Knitted soldered copper mesh and carbon nano-structure particles for lightning protection of composite materials: practice of aircraft designing to be applied to wind power production industry. // Technology system (In Russian). – 2013. – No.2. – P. 22-27.
- [8] Vishnyakov L.R., Chernyavskiy I.I., Zubkov O.V. The study of lightning protection potential for polymer composite materials reinforced with knitted copper mesh. // Bulletin of Engineering academy of Ukraine (In Russian). – 2012. – No. 2. – P. 143-148.