

УДК 621.315.668.9

Ю.Н. Бочаров, В.В. Жук, А.И. Пыльнева

**КОМПАКТНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ОПОРЫ
С ИЗОЛИРУЮЩИМИ СТОЙКАМИ
ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ**

Y.N. Bocharov, V.V. Zhuk, A.I. Pylneva

**COMPACT COMPOSITE INSULATION TOWERS
FOR HIGH VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES**

Возможность эффективного использования легких композитных материалов в конструкциях опор воздушных линий электропередач — актуальный вопрос. Традиционно считается, что основные преимущества композитных опор определяются их массогабаритными свойствами. Немаловажно, что использование электроизоляционных преимуществ строительных композитов может позволить оптимизировать конструкции воздушных ЛЭП. В настоящей статье представлены результаты анализа грозозащиты и изоляции воздушной линии 220 кВ, имеющей молниезащитный трос, при использовании композитных опор с электроизоляционными свойствами. Показано, что изолирующие свойства опоры позволяют снизить габариты линии и повысить ее надежность.

КОМПОЗИТНЫЕ ОПОРЫ; ИЗОЛЯЦИОННЫЕ ОПОРЫ; СНИЖЕНИЕ ГАБАРИТОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП; ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ; ГРОЗОЗАЩИТА.

Effective applicability of composite materials in towers for high voltage overhead transmission lines is a question of present interest. According to the conventional opinion, primary benefits of composite towers are specified by lightweight and compact size of composite modules. Significantly, that electrical insulating properties of composite towers can be used for more efficiency of constructions. This article focuses upon findings of lightning protection and insulation for 220 kV overhead transmission line with the lightning conductor and electric insulating towers. It is shown that by using insulating properties of composite towers it is possible to decrease dimensions of 220 kV line and increase its operational reliability.

COMPOSITE TOWERS; ELECTRIC INSULATION TOWERS; COMPACTIZATION OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES; ELECTRIC INSULATION; LIGHTNING PROTECTION.

Общей целью нашей работы было определение эффективности применения на воздушных линиях электропередач (ВЛ) с грозозащитным тросом компактных композитных опор с электроизоляционными стойками. В качестве конкретных задач определены следующие:

разработка эскизов компактных опор нескольких конфигураций для ВЛ 220 кВ с грозозащитным тросом при использовании комбинированной изоляции, состоящей из полимерной консольной траверсы и изоляционной композитной стойки;

сравнительный анализ грозоупорности ВЛ с разработанными опорами и опорами традиционных конструкций;

формирование выводов о перспективах использования инновационных решений применения изоляционных опор.

Вопрос применения легких и быстровозводимых композитных опор для воздушных линий электропередачи приобретает все большую актуальность. Существуют как российские, так и зарубежные разработки в этой области. Основное преимущество композитных опор — их малый вес, что позволяет упростить монтаж и эксплуатацию [1]. Немаловажно, что наряду с массогабаритными преимуществами стеклопластиковые опоры имеют электроизоляционные свойства.

Долгое время создание изоляционных опор ограничивалось деревянными конструкциями и опорами из электроизоляционного бетона. В силу разных причин, связанных с эксплуатационными и физическими характеристиками дерева и бетона, широкого применения данные решения не нашли. Композитные конструкции лишены многих недостатков, которыми обладают изделия из бетона и дерева, а их использование в качестве изоляционных крайне привлекательно.

Значительных результатов в создании композитных опор удалось достичь канадской фирме RStechologie inc., производящей модульные стеклопластиковые стойки RStandart™. В основном они используются для ВЛ среднего напряжения, в сетях уличного освещения, а также на

линиях до 240 кВ. Большое количество таких опор установлено по всему миру, в том числе две опоры установлены на опытном участке ВЛ 110 кВ в Якутии.

На основе стоек RStandart™ для России разработаны опоры серии ПРС и ППРС на 110–500 кВ с металлическими решетчатыми траверсами, которые пока не нашли применения. По аналогии с канадскими опорами компанией «Феникс-88» созданы опоры серии ПК на 110 и 220 кВ, оснащенные современными изолирующими консольными траверсами. Одна опытная опора ПК смонтирована на ВЛ 110 кВ в Тюменской области в 2013 году, планируется применение этих опор и на других ВЛ.

Основные типы существующих композитных опор представлены на рис. 1. Как правило, все опоры имеют металлические элементы, грозозащитные тросы и заземление. Это накладывает ограничения на возможность использования изоляционных свойств композитных стоек. Более того, по результатам расчетов, отраженных в [2–4], при высоких одностоечных опорах следует ожидать увеличения числа отключений из-за большой индуктивности заземляющего спуска. Этой проблемы не возникнет при выполнении

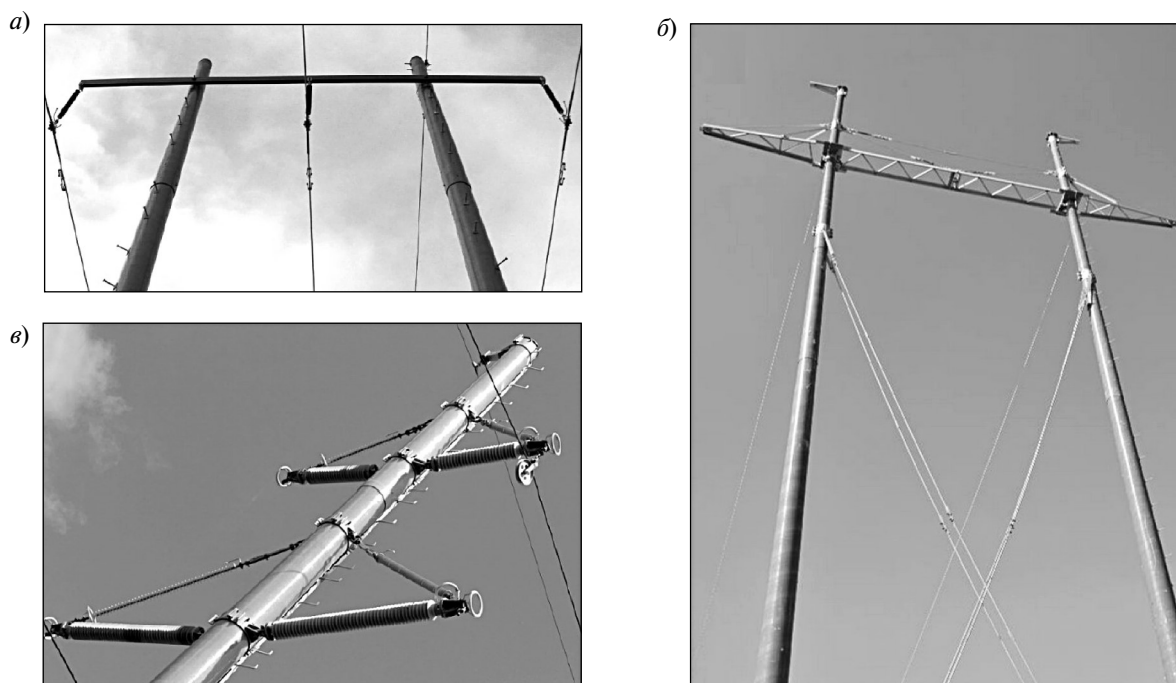


Рис. 1. Композитные опоры:

а — зарубежные опоры RStandart™; *б* — опора ППРС 330–1 со стойками RStandart™ и металлическими траверсами; *в* — опора ПК 110–2 со стеклопластиковыми стойками «Феникс-88» и полимерными консольными траверсами

опор по схемам опор деревянных. Те же расчеты указывают на эффективность использования изолирующих свойств опор.

Впервые идея прямого использования изолирующих свойств опоры реализована в Китае. Для повышения грозоупорности линии на опорах 110 кВ стандартных типоразмеров использована изолирующая стойка из модулей RStandard™, а заземляющий спуск троса отнесен от нее на расстояние, что позволило обеспечить заземление троса при использовании изолирующих свойств стойки. По экспериментальным и расчетным данным грозоупорность линий с такими опорами увеличивается на 54 %, обеспечивается защита полимерных траверс опоры от дуги тока короткого замыкания и увеличивается длина пути утечки изоляции [5, 6]. В этих конструкциях параметры изоляции ВЛ определяются разрядным промежутком «провод — спуск», а не характеристиками изолятора.

Анализируя данную идею, можно полагать, что вынесенный спуск на изоляционной опоре позволит сделать ВЛ более компактной без ущерба ее грозозащите и без применения ограничителей перенапряжений (ОПН).

Разработка эскизов опор с изоляционными стойками и анализ эффективности их применения

Для определения эффективности предполагаемого метода в условиях российских стандартов были спроектированы эскизы промежуточных опор одноцепной ВЛ 220 кВ с изолирующей

стойкой при наличии грозозащитного троса. Полученные эскизы использованы в сравнительном анализе грозозащиты.

Для составления эскизов опор проведен механический расчет проводов и тросов по методу предельных состояний при усредненных климатических условиях. По требованиям Правил устройства электроустановок определены габаритные расстояния между проводами и тросами. При этом учтено, что стойка опоры — электроизоляционная. Конструкция для заземления троса рассмотрена в двух вариантах, как показано на рис. 2, б. В первом случае провода имеют смешанное расположение, а заземляющий спуск троса проходит в продольной плоскости ВЛ; во втором варианте провода располагаются вертикально, а заземляющий спуск отнесен в сторону от опоры. В расчете принят современный трос, аналогичный тросу С-70, провод — АС 400-51 при длине пролета 280 м.

В качестве допущения принято, что по механическим условиям существует возможность обеспечить требуемую прочность опор при использовании модулей RStandard™, на что указывают результаты работ [5, 7]. Используются полимерные траверсы, состоящие из опорного изолятора и изолятора-оттяжки, с разрядной длиной, соответствующей ВЛ 220 кВ. Изоляционные расстояния по поверхности композитных модулей определены на основе данных, приведенных в [8]. В результате эскизного проектирования получены два варианта опор.

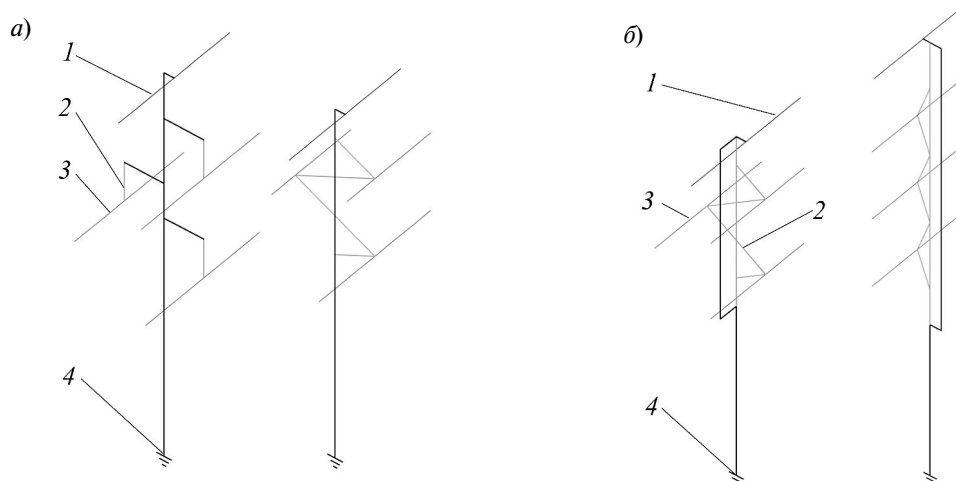


Рис. 2. Схемы опор традиционной конструкции (а) и при использовании изолирующих свойств композитной стойки (б):

1 — грозозащитный трос; 2 — изоляция; 3 — фазные провода; 4 — заземление

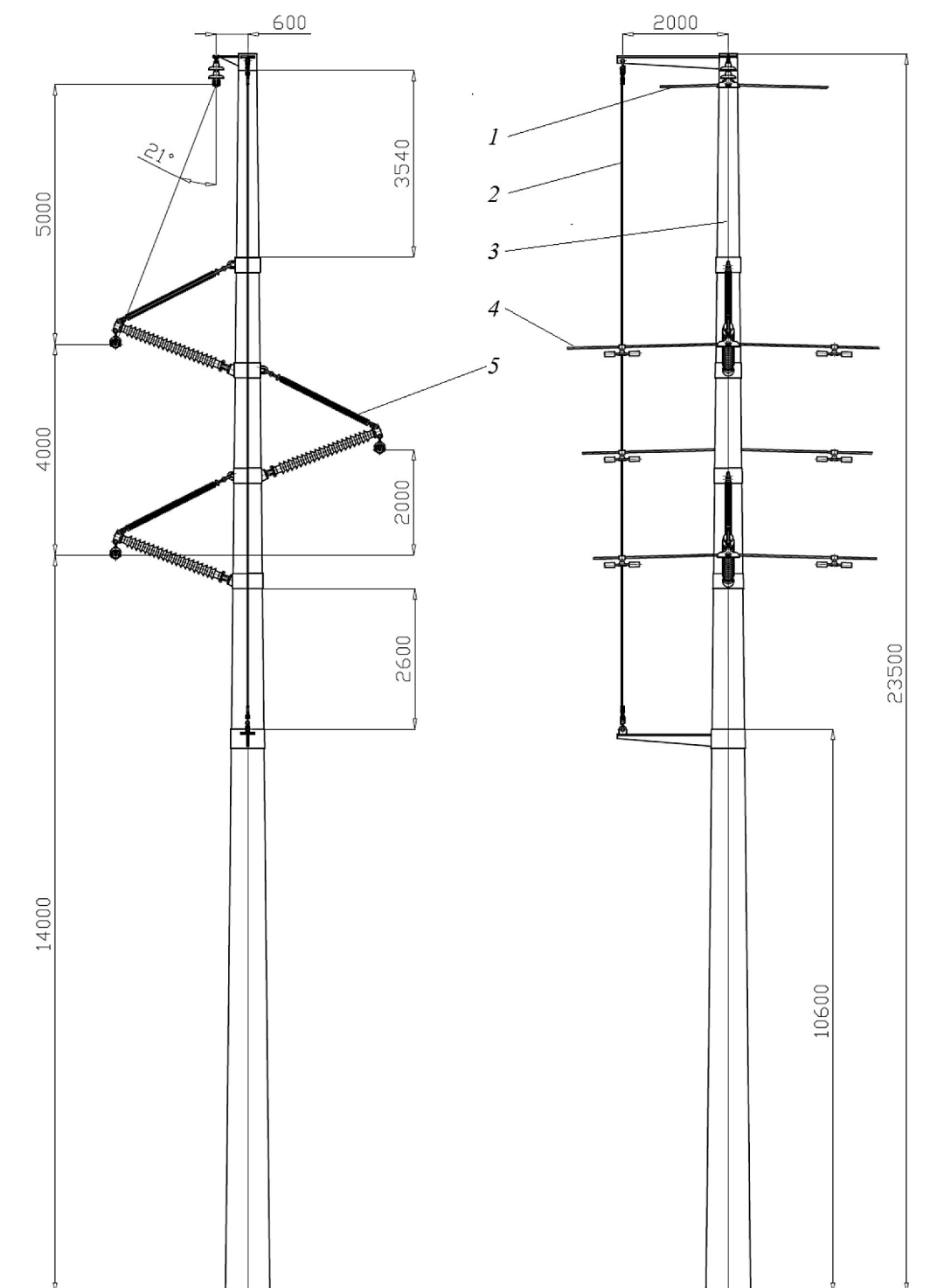


Рис. 3. Эскиз опоры с изолирующей стойкой и смешанным расположением фаз для одноцепной ВЛ 220 кВ:

1 — грозозащитный трос; 2 — заземляющий спуск троса; 3 — изолирующая композитная стойка; 4 — фазный провод; 5 — консольная изолирующая траверса



На рис. 3 представлены эскизы опор со смешанным расположением фаз. Расстояние между проводами ВЛ в свету составляет 5 м, что определяет ширину коридора линии. Высота опоры составляет 23 м при высоте подвеса провода в 14 м. Габаритные размеры изолирующей траверсы указанной опоры представлены на рис. 4. Разрядная длина промежутка «провод — спуск» составляет 2,5 м.

Эскиз опоры с вертикальным расположением фаз изображен на рис. 5. Высота опоры составляет 27 м. Конструкция позволяет обеспечить малый угол тросовой защиты; разрядная длина изоляционного промежутка «провод — спуск» составляет 3,25 м.

В перспективных конструкциях опор величина координирующего разрядного промежутка «провод — спуск» может быть увеличена; металлические элементы банджа на изоляционной части опоры могут выполняться композитными; заземляющий спуск может быть помещен внутрь стойки, что должно улучшить эксплуатационные характеристики линий.

Для полученных вариантов опор, а также бетонных опор ПБ 220–1, композитных ПРС 220–1 и композитных ПК 220–1 проведены сравнительные расчеты грозоупорности по методике руководящих указаний. Наибольшего внимания заслуживают результаты оценки поражения опоры молнией с возникновением обратных перекрытий; они представлены в относительных единицах на рис. 6.

Опоры с изолирующими траверсами и изолирующей композитной стойкой при вынесенном спуске имеют меньшие габаритные размеры, а по параметрам изоляции и грозозащиты могут сравниться или превзойти традиционные опоры. Трасса одноцепной ВЛ 220 кВ с изолирующей композитной опорой может быть на 44 % уже трассы ВЛ на опорах ПБ 220–1 и композитных опорах ПРС 220–1, на 17 % уже трассы для композитных опор ПК 220–1. В случае вертикального расположения проводов на изоляционной опоре эти значения улучшаются соответственно до 78 % и 72 %.

Кроме того, при использовании композитных опор стойка обеспечивает достаточное изоляционное расстояние от троса до проводов, что позволяет отказаться от заземления троса на части опор и от жесткого нормирования сопротивления заземления. В некоторых обоснованных случаях возможен отказ от обустройства заземления опоры, несмотря на наличие грозозащитного троса.

Перспективы использования изолирующих свойств опор

Использование изолирующих свойств опор рассмотренной конструкции позволяет решить экономические и технологические проблемы возведения ВЛ в стесненных условиях, уменьшить размеры отчуждаемой при строительстве ВЛ территории, оптимизировать

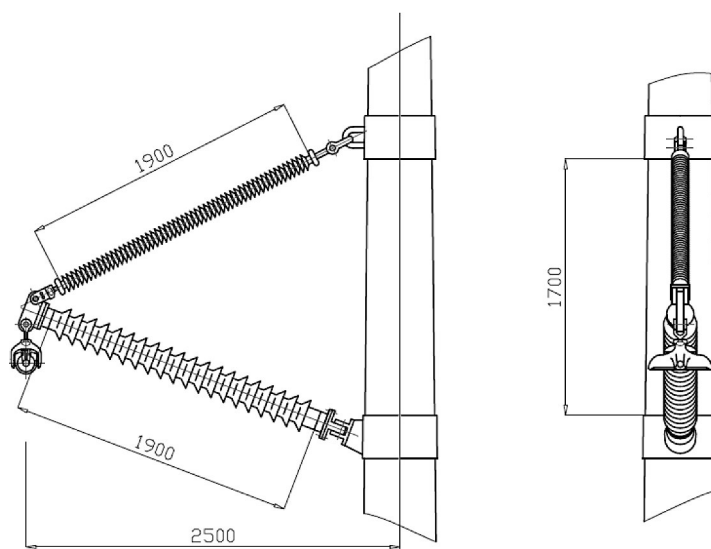


Рис. 4. Изолирующая траверса опоры 220 кВ со смешанным расположением фазных проводов

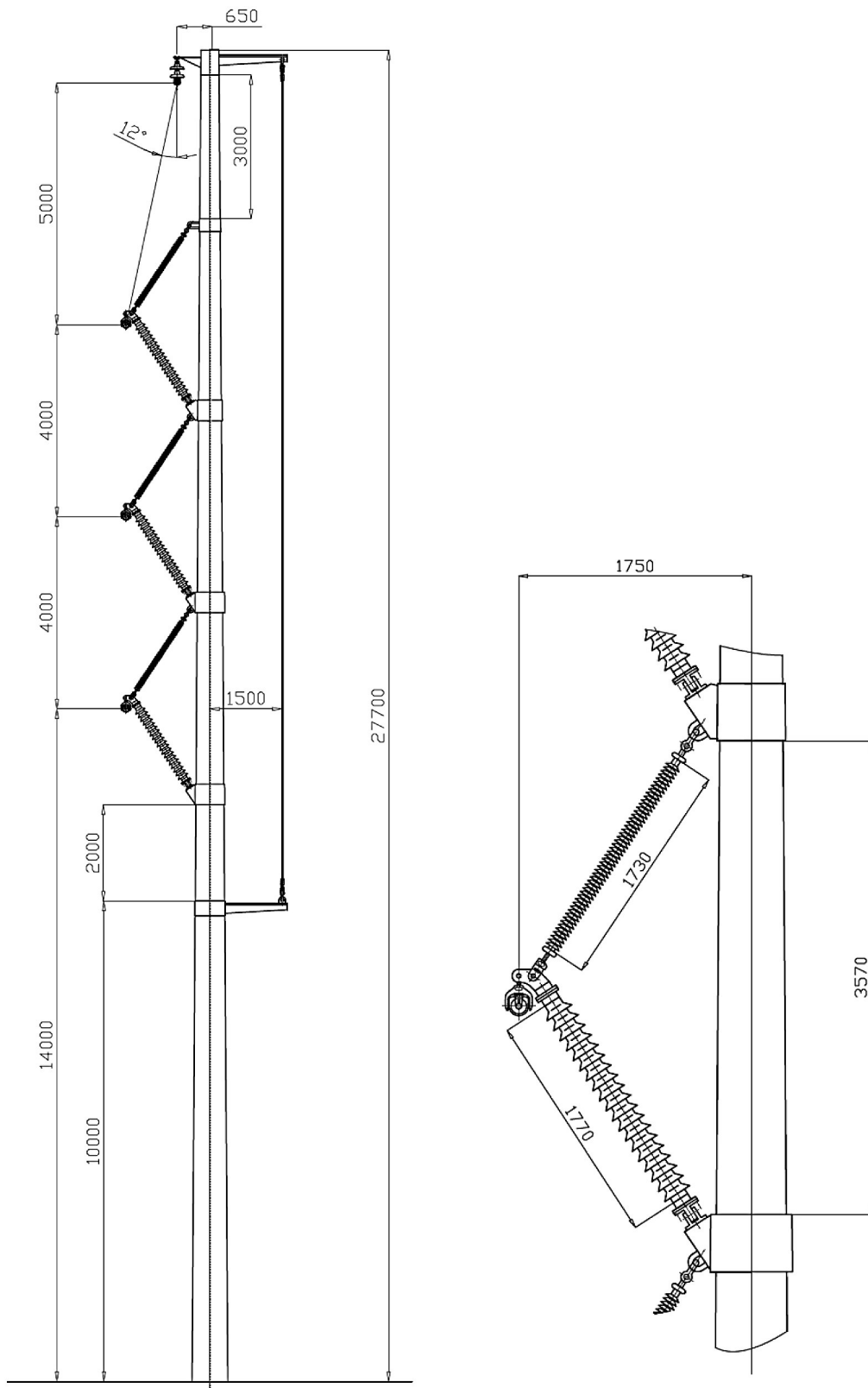


Рис. 5. Эскиз опоры с изолирующей стойкой при вертикальном расположении фаз для одноцепной ВЛ 220 кВ

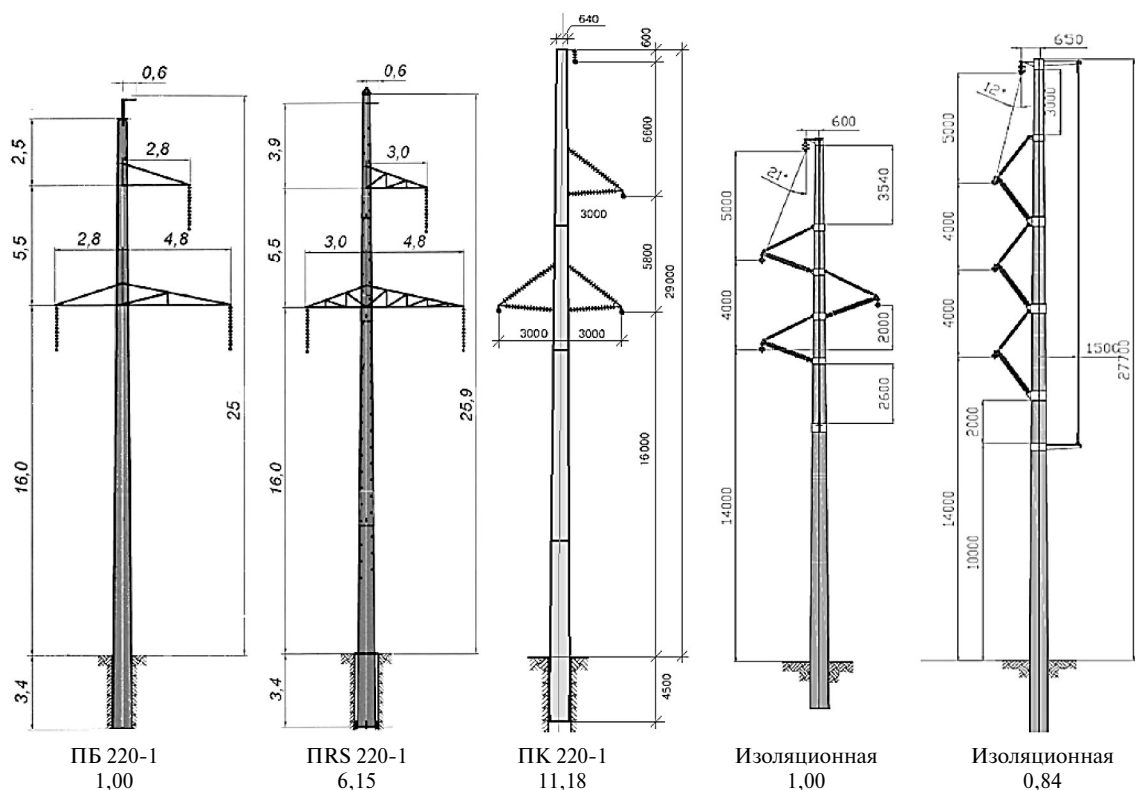


Рис. 6. Опоры различных конструкций (внизу под каждой опорой указано число отключений, в относительных единицах, от обратных перекрытий)

затраты на обустройство отдельных элементов линии, например заземляющего устройства в труднообрабатываемых и высокоомных грунтах и породах. Данное решение может подойти для реконструкции или строительства ВЛ как в промышленных районах городов, так и в ненаселенной и труднодоступной местности. Рассматриваемое решение может применяться и локально, на отдельных участках ВЛ, где требуется сужение трассы и экономия территории.

Следует отметить, что диэлектрические свойства композитных опор нуждаются в детальном изучении. Применению деревянных опор и опор из электроизоляционного бетона предшествовали исследования их физических характеристик, зависимости изоляционных свойств от различных эксплуатационных воздействий, накопление статистических данных и многое другое. Опубликованных результатов исследований по изоляционным свойствам композитных опор пока недостаточно. Материалы существующих стеклопластиковых опор в первую очередь разрабатывались как конструкционные

композиты. Предложенное в настоящей статье решение — наиболее разумное и безопасное для опытно-промышленной эксплуатации, не противоречит установленным стандартам и может быть апробировано в рамках планируемых проектов по композитным опорам.

Изучение комплекса электрофизических характеристик материала существующих опор RStandard™ и опор серии ПК, определение механизма загрязнения их композитных модулей, механизма увлажнения и пр. возможно на образцах, находящихся сегодня в реальной эксплуатации. Это позволит применять их как в составе комбинированной изоляции предложенных и иных конструкций, так и в более радикальных решениях, где провода линии крепятся к изоляционной стойке непосредственно.

Не стоит забывать о потенциале российских предприятий, производящих конструкционные композиты. Еще в [9] было обращено внимание на базальт и базальтопластиковый композит. Специализированное российское предприятие указывает на возможность задания различных

электрических и механических параметров базальтопластиковым конструкциям для обеспечения нужд электроэнергетики. Этому материалу уделяется особое внимание в силу потенциальной возможности изготовления из него не только стоек опор, но и изоляторов, линейной арматуры, сердечников для провода и т. п. В целях импортозамещения следует расширять область исследовательской деятельности и обращаться к принципиально новым решениям, среди которых можно отметить композитные опоры с заданными электроизоляционными свойствами.

В результате работы получены эскизы для компактных композитных опор ВЛ 220 кВ со сниженными габаритами. При использовании компактных опор возможно сужение ширины коридора линии от 44 до 78 %. Результаты расчета грозозащиты и изоляции показывают, что

компактные композитные опоры имеют грозоупорность не ниже, чем у традиционных опор, а при равенстве их габаритов наличие изоляционной стойки ведет к значительному увеличению грозоупорности. Опоры предложенной конструкции обеспечивают надежную работу изоляции линии. Конструкция опоры воздушной ЛЭП может быть оптимизирована за счет отсутствия заземляющего устройства при использовании изолирующей стойки.

Предлагаемые решения могут быть внедрены в опытный проект в ближайшее время. При их реализации возможно изучение электрических характеристик композитных материалов в реальных условиях и формирование требований к ним как к самостоятельным изоляторам, что позволит рассматривать более радикальные решения в проектировании, строительстве и эксплуатации воздушных ЛЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coltharp S., Vied T. Standing tall against the elements // *Transmission & Distribution World*. 2010. Vol. 62, No 3.
2. Бочаров Ю.Н., Жук В.В. К вопросу о композитных опорах воздушных линий // *Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика*. Вып. 4-1/2012(8). С. 78–85.
3. Бочаров Ю.Н., Жук В.В. Общие вопросы грозозащиты и изоляции ВЛ высокого напряжения с композитными опорами // *Воздушные линии*. 2012. №4 (9). С. 85–90.
4. Жук В.В. Анализ грозозащиты ВЛ 110–330 кВ с композитными опорами // *Сб. докл. 7-й междунар. конф. «Многогранные гнутые стойки»*. Украина. Крым. Николаевка, 2012. С. 171–179.
5. Han-ming Li, Shi-cong Deng, Qian-hu Wei, Yu-ning Wu. Research on Composite Material Towers Used In 110kV Overhead Transmission Lines [Электронный

- ресурс] // *High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2010 International Conference on / New Orleans, LA, 2010.— P. 572–575. IEEE Xplore (<http://ieeexplore.ieee.org>). DOI: 10.1109/ICHVE.2010.5640768
6. Бочаров Ю.Н., Жук В.В. Грозоупорность воздушных ЛЭП высокого напряжения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование*. 2013. №1(166). С. 80–82.
7. Дубина А.А., Костиков В.И. Новые конструкции полимерных стоек для опор ВЛ в РФ и Украине // *Воздушные линии*. 2011. №3 (4). С. 27–31.
8. Шевченко С.М. Анализ диэлектрических и изолирующих характеристик стеклопластиковых модулей RStandardtm // *Воздушные линии*. 2012. №4 (9). С. 46–50.
9. Бочаров Ю.Н., Жук В.В. Композитные опоры. Перспективы применения для ВЛ 110–750 кВ // *Новости электротехники*. 2012. №1 (73). С. 22–25.

REFERENCES

1. Coltharp S., Vied T. Standing tall against the elements. *Transmission & Distribution World*. 2010. Vol. 62, No 3.
2. Bocharov Yu.N., Zhuk V.V. K voprosu o kompozitnykh oporakh vozdushnykh liniy. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. Energetika*. Vyp. 4. 1/2012(8). S. 78–85. (rus.)
3. Bocharov Yu.N., Zhuk V.V. Obshchiye voprosy grozozashchity i izolyatsii VL vysokogo napryazheniya s kompozitnymi oporami. *Vozdushnyye linii*. 2012. №4 (9). S. 85–90. (rus.)

4. Zhuk V.V. Analiz grozozashchity VL 110–330 kV s kompozitnymi oporami. *Sb. dokladov 7-y mezhdunarodnoy konferentsii «Mnogogrannyye gnutyye stoyki» / Ukraina, Krym. Nikolayevka, 2012. S. 171–179. (rus.)*
5. Han-ming Li, Shi-cong Deng, Qian-hu Wei, Yu-ning Wu. Research on Composite Material Towers Used In 110kV Overhead Transmission Lines [Elektronnyy resurs] // *High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2010 International Conference on / New Orleans, LA, 2010.— P. 572–575. IEEE Xplore (<http://ieeexplore.ieee.org>). DOI: 10.1109/ICHVE.2010.5640768

6. **Bocharov Yu.N., Zhuk V.V.** Grozoupornost vozdu-shnykh LEP vysokogo napryazheniya. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ser.: Nauka i obrazovaniye*. 2013. №1(166). S. 80–82. (rus.)

7. **Dubina A.A., Kostikov V.I.** Novyye konstruktсии polimernykh stoyek dlya opor VL v RF i Ukraine. *Vozdushnyye linii*. 2011. №3 (4). S. 27–31. (rus.)

8. **Shevchenko S.M.** Analiz dielektricheskikh i izoliruyushchikh kharakteristik stekloplastikovykh moduley RStandardtm. *Vozdushnyye linii*. 2012. №4 (9). S. 46–50. (rus.)

9. **Bocharov Yu.N., Zhuk V.V.** Kompozitnyye opory. Perspektivy primeneniya dlya VL 110–750 kV. *Novosti elektrotehniki*. 2012. №1 (73). S. 22–25. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОЧАРОВ Юрий Николаевич — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: deanery@eef.spbstu.ru

ЖУК Владислав Викторович — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: beetlevladislav@gmail.com

ПЫЛЬНЕВА Алла Игоревна — студент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: allapylneva@mail.ru

AUTHORS

BOCHAROV Yurii N. — St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: deanery@eef.spbstu.ru

ZHUK Vladimir V. — St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: beetlevladislav@gmail.com

PYLNEVA Alla I. — St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: allapylneva@mail.ru