

Анализ эффективности и характеристик частотно-зависимого устройства на основе нанокристаллического ферромагнитного материала

С. М. Коробейников, О. О. Емельянова, В. А. Ломан*, А. В. Ридель, В. Е. Шевченко

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, 630073, Россия, *e-mail: Loman@corp.nstu.ru

Поступила в редакцию 29.08.2024

После доработки 12.09.2024

Принята к публикации 19.09.2024

Рассматривается вопрос защиты подстанционного оборудования, а также воздушных линий от действия высокочастотных грозовых перенапряжений с использованием устройства на основе нанокристаллической ленты из аморфизирующего ферромагнитного сплава. В качестве объекта защиты рассмотрена подстанция, на которой используется кабельная вставка между воздушной линией и вводом на подстанцию. Отличительной особенностью является тот факт, что воздушная линия 35 кВ выполнена на опорах для воздушных линий 110 кВ. Показана высокая опасность перенапряжений при такой конфигурации воздушной линии, включающей в себя кабельную вставку. Предложен способ защиты от высокочастотных перенапряжений с применением работающего на использовании аномального скин-эффекта частотно-зависимого устройства.

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, нанокристаллические материалы, грозовые перенапряжения, короткие импульсы, частотнозависимое устройство, воздушные линии электропередач, кабельные линии, термическое воздействие на материалы

УДК 537.622.4: 621.316.9

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.6.71>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для обеспечения надежности электроснабжения все чаще применяются новые решения и технологии. Одной из актуальных проблем является защита трансформаторного оборудования от воздействия высокочастотных перенапряжений различной природы. Основным источником этих перенапряжений являются грозовые воздействия.

Удары молнии традиционно считаются одним из самых опасных воздействий на изоляцию витков силового оборудования. В большинстве случаев они приводят к критическому уровню перенапряжений, который, безусловно, необходимо снижать. Например, около 60% всех отключений линий электропередачи происходит из-за ударов молнии [1, 2], а их количество зависит от региона и сезона.

Грозовые перенапряжения могут быть вызваны двумя типами воздействий: прямыми ударами молнии и электромагнитно-индуцированными перенапряжениями, обусловленными разрядом молнии вблизи линии [3]. Наиболее опасны прямые удары молнии (в опору, линию или грозовой трос); правда, индуцированные перенапряжения также часто учитываются при анализе режимов воздушных линий с номинальным напряжением 35 кВ и

ниже [4]. В связи с тем, что грозозащитный трос часто монтируется по всей воздушной линии электропередачи непосредственно над ней и соединяется с опорами, предполагается, что он обеспечивает хорошую защиту, а отключения из-за молний чаще всего происходят по причине обратных перекрытий с опоры на провод. В то же время статистика Государственной электросетевой корпорации (Китай) на рис. 1 демонстрирует обратный эффект: чем выше номинальное напряжение линии электропередачи, тем выше частота прямых ударов молнии [1, 2].

Определенный интерес представляют данные по обратным перекрытиям [5]. Так, этот вид отказов составил почти треть всех отключений вследствие молний в 2018 году в Китае (рис. 2).

Высокочастотные переходные процессы могут быть вызваны грозовой активностью, особенно в северных регионах, которые осложняются проблемой импульсного сопротивления заземления опор и частыми обратными пробоями [6–8].

Существует множество применяемых методов и средств защиты с различными нюансами, преимуществами и недостатками. Например, использование нелинейных ограничителей перенапряжений, установка разрядников на каждой опоре, комбинирование различных

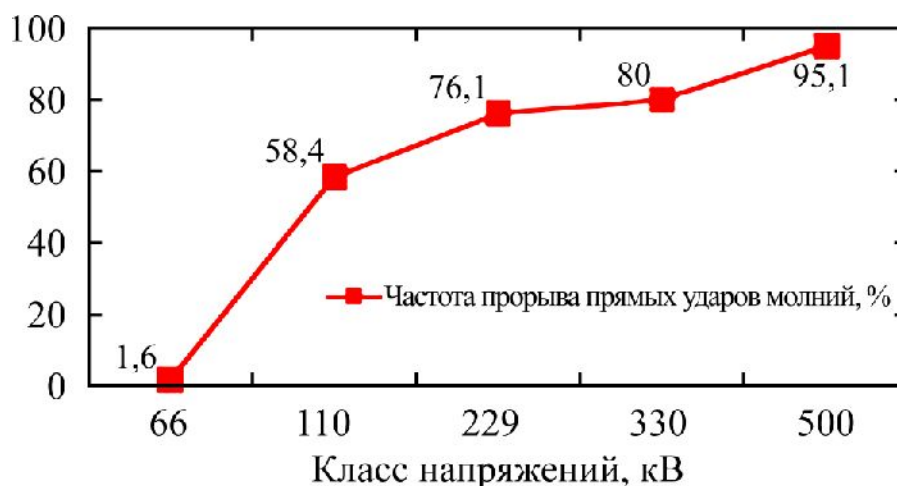


Рис. 1. Коэффициент прорывов молнии (%) от общего числа отключений из-за молний на воздушных линиях электропередачи напряжением 66–500 кВ [1].



Рис. 2. Диаграмма годового общего количества отключений электроэнергии из-за молний (2018 г., Государственная сетевая корпорация, Китай).

методов защиты и т.д. [1, 4, 9–14]. Одним из перспективных направлений показывает себя использование частотно-зависимых композитных проводников с ферромагнитным покрытием, в том числе [15] частотно-зависимых устройств (ЧЗУ) [16].

Принцип работы частотно-зависимого устройства основан на скин-эффекте, то есть сопротивление устройства существенно увеличивается с ростом частоты падающего сигнала за счет вытеснения тока из материала с хорошей проводимостью (алюминий) в материал с низкой проводимостью (ферромагнитный материал), расположенный вокруг токопроводящего провода. Соответственно, при прохождении волны высокочастотного перенапряжения за счет скачка параметров ЧЗУ происходит уменьшение амплитуды и крутизны импульса.

Были проведены испытания, моделирование и опытная эксплуатация образцов устройств ЧЗУ. Данные исследования показали высокую эффективность устройств в качестве защиты от высокочастотных перенапряжений [16–18]. Однако в ходе работы возникло несколько вопросов по ЧЗУ, которые необходимо проанализировать для дальнейшего успешного и эффективного приме-

нения. Так, например, нужно оценить защитные свойства устройства при наличии кабельной вставки на защищаемом объекте.

В настоящее время линии электропередачи высокого напряжения широко используются в сочетании с силовыми кабельными линиями [19–21]. Но у этих типов линий электропередач есть некоторые проблемы, связанные с надежностью. Так, были зафиксированы аварии на высоковольтных линиях электропередач 110–220 кВ [22–25]. Половина отказов произошла в кабельных муфтах.

В [24] рассматривалась реальная линия электропередач с кабельными вставками, на которой произошли три аварии, приведшие к выходу из строя большого количества соединителей кабель–линия по длине линии электропередач. На основании расчетов выдвинута одна из версий, объясняющих причины данных аварий, связанная со значительными высокочастотными перенапряжениями в кабельных разъемах при коротких замыканиях (КЗ). Также были приведены примеры отказов силового оборудования при коммутациях вакуумными выключателями протяженной кабельной линии.

При определенных условиях уровень перенапряжений может значительно превышать импульсную прочность изоляции кабельной линии, поэтому должны быть разработаны различные методики его ограничения [22, 26]. Повышение прочности изоляции кабельной вставки не может быть достаточным методом, следует применять другие превентивные меры, например, использовать ЧЗУ.

Ранее другими исследователями уже проводились работы в области оценки надежности современного совместного использования кабельных вставок и воздушных линий [19–21, 27]. Отдельно стоит упомянуть значительный эффект укорачивания фронта волны при переходе от кабельной вставки к нагрузке, имеющий емкостный характер [28]. Что значительно повышает опасность волны как для оборудования, так и для самой кабельной линии. Однако в настоящей работе показан случай, когда воздушная линия изначально была спроектирована на более высокое напряжение, чем используемое. То есть в данной работе основное внимание уделено анализу грозовых перенапряжений и их влиянию на изоляцию воздушной линии с кабельной вставкой 35 кВ, размещенной в каркасе воздушной линии 110 кВ. Это более опасный случай, так как возникают перенапряжения, характерные для линий 110 кВ, а изоляция рассчитана на 35 кВ. Будет рассмотрено воздействие срезанных высокочастотных импульсов, которые обычно возникают из-за срабатывания ограничителей перенапряжения (ОПН) или разрядников.

В данной работе будет оценена эффективность применения частотно-зависимых устройств для наиболее критического режима перенапряжений. Кроме того, будет дан анализ оптимальных параметров ЧЗУ. Необходимость выбора оптимальных параметров для защитных устройств возникает в соответствии с требованиями заказчика или эксплуатирующей организации. Это могут быть требования, связанные с габаритами – особенно если речь идет об установке ЧЗУ в закрытых распределительных устройствах. Или если по каким-то причинам нам необходимо защитить от высокочастотных перенапряжений трансформатор или генератор, расположенный в замкнутом или ограниченном пространстве (это могут быть, например, морские буровые установки, ветрогенераторы как в море, так и на суше, и т.д.). Или, наоборот, нам необходимо использовать устройство с повышенной или пониженной индуктивностью, чтобы оно не мешало работе ВЧ-связи.

Чтобы понять возможные габариты частотно-зависимых проводниковых устройств, которые бы учитывали как возможности современных технологий, так и ограничения, накладываемые конструкцией частотно-зависимого проводника и самого устройства, необходимо рассчитать, как габариты и другие конструктивные решения влияют на индуктивность устройства.

Что касается термостойкости устройства, то здесь основное беспокойство вызывает термостойкость ферромагнитного слоя, так как взятый за основу проводник (А-150) устойчив к термическим воздействиям в рамках требований технической документации. А при чрезмерном воздействии на ферромагнитный слой могут произойти его перекристаллизация и разрушение. Поэтому возникает необходимость оценки термостойкости проводника, причем в двух возможных сценариях – нагрев от воздействия молнии и нагрев под действием тока короткого замыкания. Резюмируя проблему использования ЧЗУ для защиты высоковольтного электрооборудования, следует в настоящей статье проанализировать три вопроса:

1. Эффективность использования ЧЗУ для защиты подстанций 35 кВ с кабельными вставками в случае монтажа в каркасе линии 110 кВ.
2. Возможность управления параметрами ЧЗУ путем изменения его габаритов.
3. Расчет термостойкости ЧЗУ на 110 кВ при воздействии грозовых перенапряжений и токов короткого замыкания.

АНАЛИЗ НЕОГРАНИЧЕННОГО ГРОЗОВОГО ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Работа, представленная в данной статье, была разделена на несколько этапов, первым из которых была оценка опасности неограниченных грозовых перенапряжений, действующих на изоляционный материал кабельных линий. Для этого была смоделирована короткая волна со следующими исходными параметрами:

- волновое сопротивление линии – 350 Ом;
- длина участка кабельной линии от высоковольтной линии (ВЛ) до открытого распределительного устройства (ОРУ) 35 кВ – 500 м;
- суммарная емкость всего силового оборудования подстанции – 3500 пФ (с конденсаторов, трансформаторов напряжения, выключателей, разъединителей и т.п.)

Важно отметить, что в нормативных документах не указаны требования и значения мощности силового оборудования для распределительных устройств 35 кВ, в связи с этим суммарная мощность оборудования принималась

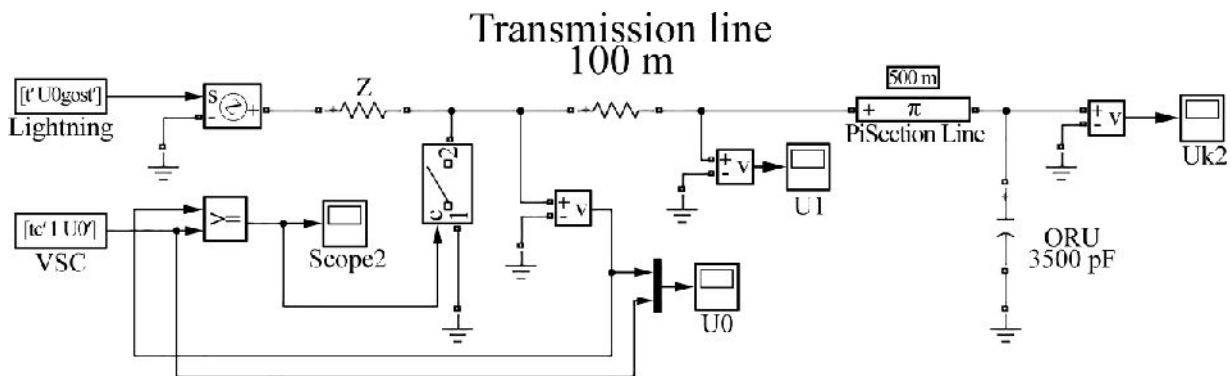


Рис. 3. Расчетная модель для анализа неограниченных грозовых перенапряжений, вызванных воздействием срезанного импульса и индуцированной волны на изоляцию кабельной линии.

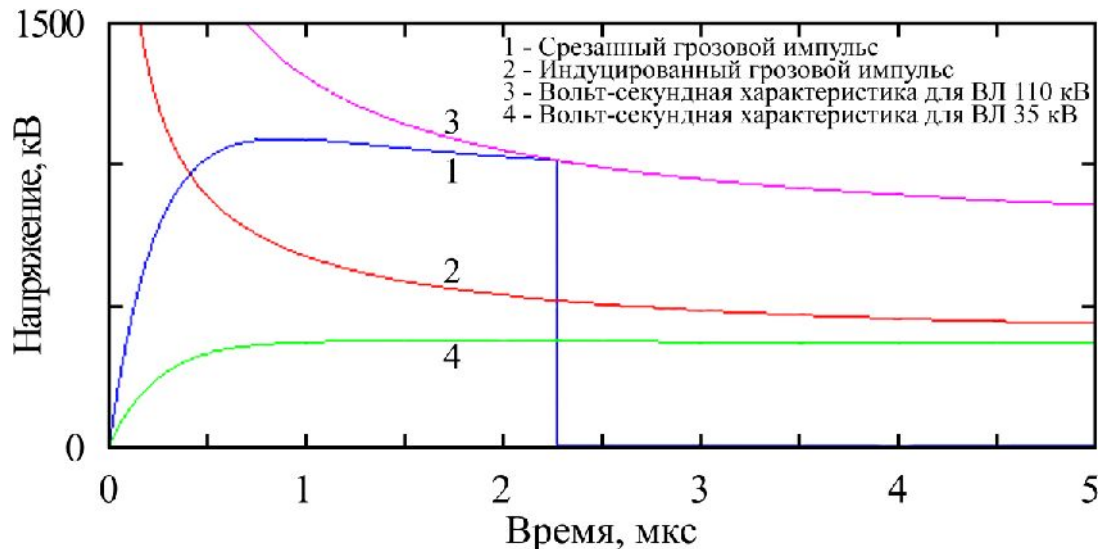


Рис. 4. Срезанный грозовой импульс и индуцированное напряжение формируют воздействие на изоляцию кабельной линии 35 кВ.

в соответствии с [17] и с учетом номинального напряжения сети.

На основании проектной документации сечение кабеля, применяемого в кабельной линии 35 кВ, составляет 240 мм^2 , в связи с чем приняты следующие показатели кабеля:

- сопротивление – $0,075 \text{ Ом/км}$,
- индуктивность = $0,37 \text{ мГн/км}$,
- емкость = $0,24 \text{ мкФ/км}$.

Схема расчетной модели представлена на рис. 3. С помощью данной модели был проведен анализ неограниченных грозовых перенапряжений при действии импульсов с большой крутизной фронта, а также влияния этих импульсов на изоляцию кабельной линии.

В [29] говорится, что минимальные значения эффективных амплитуд тока молнии имеют диапазон $5\text{--}7 \text{ кА}$ с учетом волнового сопротивления порядка $300\text{--}400 \text{ Ом}$, действующих перенапряжений порядка $1000\text{--}1400 \text{ кВ}$. Такие высокие перенапряжения превышают импульсную прочность изоляции даже для ВЛ 110 и 220 кВ. Сами же параметры фактических перенапряжений определяются через пересечение вольт-амперных

характеристик падающей волны и характеристик изоляции ВЛ. Это показано на рис. 4.

На амплитуду перенапряжений, их частотный диапазон влияют многие параметры, такие как: параметры тока молнии, состав, конфигурация и номинальное напряжение подстанции, длина кабельного фидера, параметры адаптеров и т.д.

Индуцированные перенапряжения в общем случае приблизительно определяются амплитудой тока молнии I_m , высотой подвеса провода h_w и расстоянием до точки удара b :

$$U_{ind} = (k_1 + k_2) \times \frac{h_w}{b} \times I_m \approx 30 \times \frac{h_w}{b} \times I_m. \quad (1)$$

После традиционного расчета грозоустойчивости ОРУ 35 кВ уровень перенапряжения был рассчитан при средней высоте подвеса провода $h_w = 25$ метров, разряде молнии на расстоянии $30\text{--}50 \text{ м}$ от воздушной линии электропередачи, амплитуде тока молнии $I_m = 25\text{--}40 \text{ кА}$.

Таким образом, максимальное значение индуцированных перенапряжений можно принять равным $U_{ind} = 345 \text{ кВ}$, расчетный индуцированный грозовой импульс показан на рис. 5.

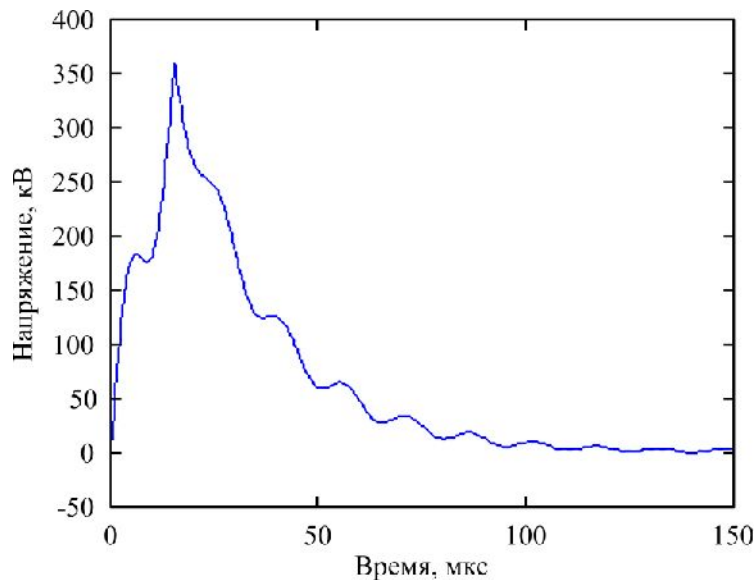


Рис. 5. Результаты расчетов неограниченных грозовых перенапряжений, вызванных срезанным импульсом и полным (индуцированным) воздействием грозового импульса на изоляцию кабельной линии.

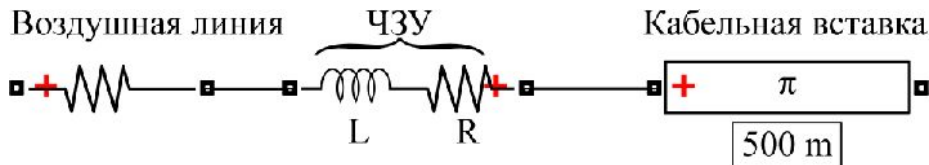


Рис. 6. Схема замещения установки ЧЗУ между воздушной линией электропередачи и участком кабельной линии.

В результате расчета получено значение напряжения в кабельной линии без защитных систем при расположении ВЛ 35 кВ на каркасе ЛЭП 110 кВ, которая применяется сравнительно часто. На полученной осциллограмме можно отметить, что напряжение превышает 350 кВ, тогда как допустимый уровень перенапряжения по требованиям эксплуатации не должен превышать 170 кВ.

Это без учета требований к другим элементам подстанции, например, на изоляцию силового трансформатора 35 кВ рассчитано влияние напряжений не выше 210 кВ.

Также следует отметить, что в настоящее время наблюдается тенденция замены маслонаполненных кабелей на изоляцию из сшитого полиэтилена. Это обусловлено рядом преимуществ, которые несут в себе кабели с такой изоляцией, однако есть и недостатки, так как кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена очень чувствительны к высокочастотным перенапряжениям, что влияет на их импульсную прочность.

Учитывая вышеизложенное, становится ясно, что для повышения надежности работы кабельных вставок и подстанций в целом и защиты их от действия высокочастотных перенапряжений необходимо разрабатывать и внедрять средства защиты, ограничивающие высокочастотные перенапряжения.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА В ПОДАВЛЕНИИ ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Поскольку параметры ЧЗУ определяются конструкцией, возможны различные вариации их исполнения с разными значениями сопротивления и индуктивности (рис. 6). Так, для расчета влияния перенапряжения частотой 300 кГц были приняты значения сопротивления устройства в диапазоне 50–150 Ом и индуктивности 0,5–1,5 мГн.

Данные параметры были выбраны на основе анализа результатов низковольтных испытаний прототипов устройств в диапазоне частот от 50 Гц до 1 МГц и при токах до нескольких кА. Важно отметить, что на данный момент ЧЗУ уже используются на воздушных линиях, и там реализованы устройства со следующими параметрами: сопротивление 150 Ом (на частоте 300 кГц), индуктивность 2 мГн.

Параметры были основаны на нескольких факторах, таких как эффективность гашения импульсов, экономичность, низкая стоимость изготовления и оптимальные габариты для удобства транспортировки и эксплуатации.

На рис. 7 можно увидеть результаты расчета напряжения на выходе ЧЗУ, установленного на воздушной линии 35 кВ, размещенной в габаритах 110 кВ. Видно, что не все значения параметров позволяют эффективно подавлять

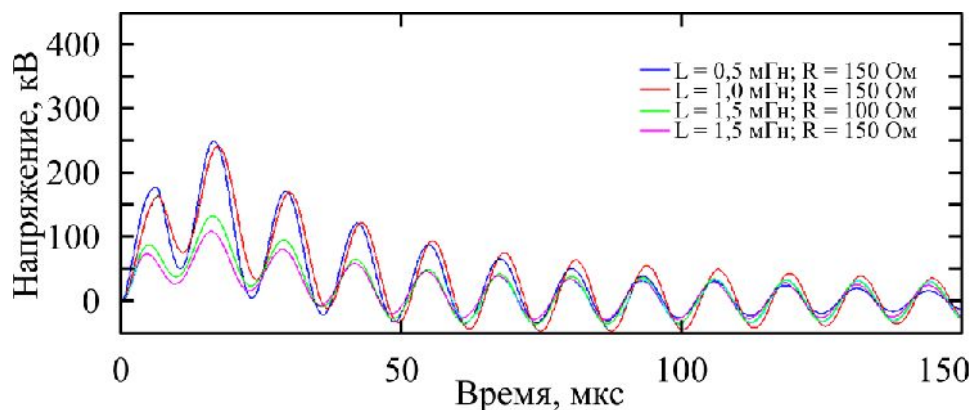


Рис. 7. Расчетные осциллограммы грозовых перенапряжений на выходе ЧЗУ при резком импульсном воздействии на изоляцию кабельной линии (для воздушной линии электропередачи 35 кВ).

перенапряжения. Набор параметров ограничен, и рекомендуется использовать устройства с сопротивлением более 50 Ом и индуктивностью 1 мГн и более.

Следует отметить, что в зависимости от требований эксплуатирующей организации могут понадобиться конкретные параметры для определенных линий. Это связано с применением других средств защиты и требований координации с ними или из-за использования высокочастотной связи.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЧЗУ

В соответствии с расчетами установлено, что изменение сопротивления ЧЗУ в определенном диапазоне не оказывает существенного влияния на защитные характеристики устройства. Другими словами, сопротивление ЧЗУ можно изменять в угоду изменению других параметров (индуктивности, размера).

В соответствии с экспериментальными измерениями, проведенными на некоторых образцах ЧЗУ, установленных на воздушной линии электропередачи 110 кВ, было выявлено, что частотно-зависимый провод длиной 130 м имеет сопротивление $R = 120$ Ом при частоте 300 кГц.

Было выяснено, что повышение сопротивления устройства выше 150 Ом на грозовой частоте не вносит существенного влияния в подавление высокочастотных импульсов, поэтому в рамках указанных пределов возможно варьирование сопротивлением устройства. В тоже время индуктивность является важным параметром, от которого может зависеть не только степень воздействия на высокочастотный импульс, но и другие эффекты, например, ВЧ-связь. Поэтому, с одной стороны, повышение индуктивности устройства, ведет к повышению эффективности подавления, но при этом может вызывать проблемы с точки зрения эксплуатации ВЛ.

Поэтому задача анализа возможного взаимного влияния характеристик для получения соответствующей индуктивности и настройки оптимальных параметров является актуальной и важной.

Расчет индуктивности проводился с помощью программы, использующей алгоритм для расчета катушки с шагом N и другими входными параметрами, и учетом интеграла Джона Неймана [30].

Данная программа позволяет с высокой точностью рассчитывать индуктивность при различных шагах катушки.

В расчетах учитывался провод А-150 диаметром 15,8 мм. Толщина ферромагнитного слоя не учитывалась из-за ее слабого влияния на габаритные параметры катушки.

В расчете для повышения точности идет учет не только параметров проводника, но и толщины нанесенной на него изоляции. При проектировании ЧЗУ предполагается использовать полимерную изоляцию с электрической прочностью не менее 25 кВ/мм. Расчеты проводились для толщины изоляции 3,5 мм ввиду ее использования для экспериментальных образцов. Следует отметить, что для надежной работы оборудования обычно достаточно толщины изоляции 2 мм в соответствии с [30].

Частота расчета принималась равной 300 кГц, что примерно соответствует грозовой частоте прямого удара молнии.

Расчеты индуктивности ЧЗУ проводились для различных случаев с целью оценить возможность управления этим параметром через конструкцию и габариты устройства.

Достаточно простым и тем не менее важным для начала является полученный линейный характер роста индуктивности в зависимости от длины проводника. С учетом линейного роста активного сопротивления с длиной проводника получается простое решение по одновременному

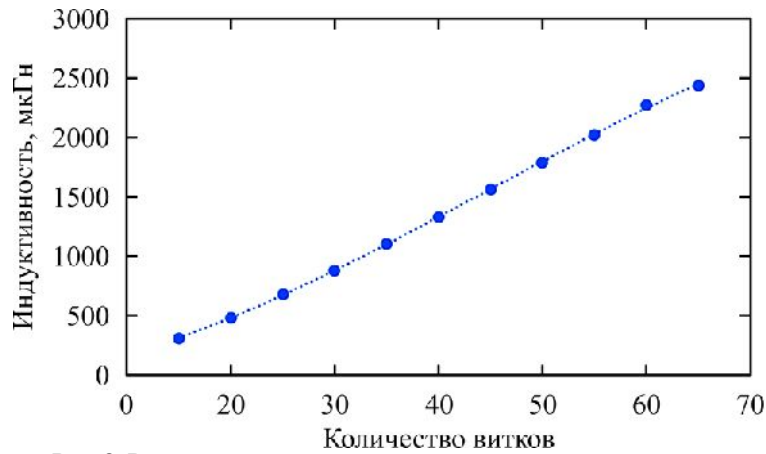


Рис. 8. Влияние количества витков на индуктивность устройства.

Таблица 1. Результаты расчетов катушек индуктивности при их постоянном диаметре и различном числе витков

	Количество витков										
	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15
Длина проводника в катушке, м	208	192	176	160	144	128	112	94	80	64	48
L , мкГн	2440	2274	2024	1793	1561	1332	1102	880	677	484	309

управлению параметрами активного сопротивления на грозовых частотах и индуктивностью путем управления длиной частотно-зависимого кабеля в устройстве.

Это может быть полезно для обеспечения заданных параметров линии и, например, соответствия требованиям релейной защиты отдельных участков линии (рис. 8, табл. 1).

Можно отметить, что увеличение количества витков в 4 раза (с 15 до 60) приводит к увеличению индуктивности более чем в 7 раз (с 309 до 2274 мкГн).

Далее было принято решение провести расчет частотно-зависимого проводника с фиксированной длиной провода, но изменением диаметра и количества витков. Расчеты проводились в диапазоне диаметров от 500 до 1500 мм, это связано с технической сложностью реализации диаметра частотно-зависимого кабеля А-150 менее 500 мм, а диаметр более 1500 мм уже неудобен для эксплуатации, транспортировки и монтажа на подстанции. Результаты расчетов представлены на рис. 9 и в табл. 2.

Из расчетов видно, что наибольшие значения индуктивности достигаются для всех длин в диапазонах от 1000 мм до 1400 мм.

Оптимальным будет использование диаметра уже стандартного оборудования (например, ВЧ-заградителя), имеющего диаметр 1000 мм. Но в зависимости от требований к конструкции и параметров диаметр может быть увеличен до 1500 мм, что приводит к повышению индуктивности и уменьшению длины катушки.

Еще один параметр, который можно изменять, – это длина катушки, которая зависит от расстояния между витками катушки (шага). На рис. 10 и в табл. 3 приведены результаты расчетов для диаметра катушки 1000 мм, длины провода 100 м, количества витков 31.

Расчеты проводились для двух случаев:

- изоляция провода (термоусадочная лента) постоянной толщины (3 мм);
- толщина изоляции соответствует межвитковому зазору (литая изоляция).

Видно, что при большем размахе катушки разница между литой изоляцией и изоляцией с постоянной толщиной немного превышает 5%.

Расстояние между катушками и межвитковый зазор следует минимизировать для увеличения индуктивности и обеспечения соответствующей электрической прочности.

РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЧЗУ

Важной составляющей работы устройства при эксплуатации воздушных линий является требование к термической устойчивости при влиянии как грозовых воздействий, так и токов короткого замыкания. Если устройство неустойчиво к термическому воздействию токов короткого замыкания, то работа всей системы может быть нарушена даже без высокочастотных перенапряжений.

Сначала проанализируем влияние токов короткого замыкания на нагрев устройства. Ток короткого замыкания имеет низкую частоту, то есть не влияет на ферромагнитный слой и проте-

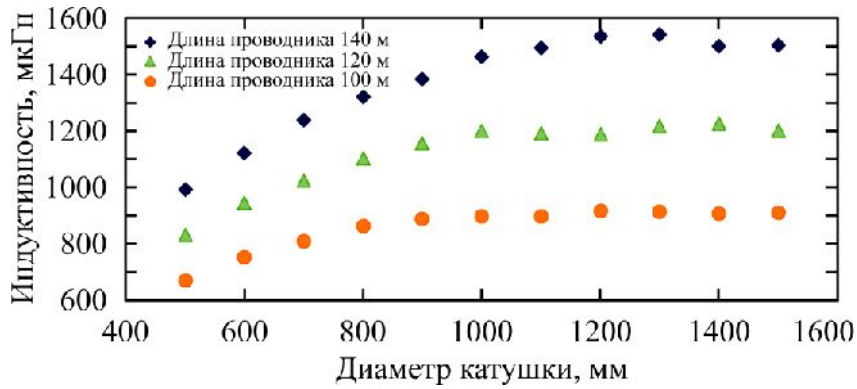


Рис. 9. Зависимость индуктивности от диаметра катушки при фиксированной длине провода.

Таблица 2. Результаты расчетов трех катушек с различной длиной проводника

D, мм	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600	500
140 м											
N	29	31	34	37	40	44	48	54	62	72	85
L, мкГн	1504	1500	1542	1534	1495	1462	1385	1322	1240	1121	992
120 м											
N	25	27	29	31	34	38	42	47	53	62	73
L, мкГн	1202	1225	1217	1188	1192	1200	1158	1103	1024	946	832
100 м											
N	21	22	24	26	28	31	34	39	44	51	61
L, мкГн	912	909	914	918	898	897	890	864	811	754	672



Рис. 10. Зависимость индуктивности FDD от шага катушки.

Таблица 3. Результаты расчета катушек индуктивности при различном шаге катушки

	Шаг катушки, мм										
	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15
Изоляция постоянной толщины (3 мм)											
L, мкГн	936	858	793	737	690	649	612	580	552	526	502
Сплошная изоляция											
L, мкГн	936	862	800	748	704	665	631	601	574	550	529

кает по всей толщине проводника. Однако он имеет большую амплитуду тока до 30 кА (а в некоторых случаях и выше). Тогда для воздушной линии 110 кВ повышение температуры можно оценить из известного выражения:

$$c_p \frac{dT}{dt} = \frac{j^2}{\sigma}, \quad (2)$$

где: c – удельная теплоемкость материала, Дж/кг·К; ρ – плотность, кг/м³; dT/dt – скорость нарастания температуры, К/с; j – плотность тока, А/м²; σ – проводимость, См/м.

Плотность тока определяется путем деления тока короткого замыкания на площадь поперечного сечения проводника. S , $j = I_{кз}/S$. Тогда окончательное выражение для расчета скорости нагрева будет выглядеть так:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I_{КЗ}^2}{S^2 \sigma_{ср}}. \quad (3)$$

Для ВЛ 110 кВ $S = 150 \text{ мм}^2$. Учитывая, что средняя плотность алюминия, используемого в проводах, составляет $2,7 \text{ г/см}^3$, удельная теплоемкость равна $930 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, а проводимость – $3,6 \times 10^7 \text{ См/м}$ [31].

Тогда, подставив в выражение числовые данные, включающие ток короткого замыкания, например, 30 кА, можно получить скорость нарастания температуры алюминия $dT/dt = 70 \text{ К/с}$.

Поскольку требований по термостойкости для ЧЗУ пока нет, то ввиду схожести конструкции целесообразно сравнить термостойкость ЧЗУ с требуемой для ВЧ-заградителя.

Так, согласно СТО 56947007-33.060.40.125-2012 [32], заградитель должен выдерживать температуру не менее $250 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 с. Такая же температура установлена и для фазных проводов (элемент конструкции ЧЗУ). В худшем случае при использовании ЧЗУ 110 кВ за 1 с нагрева устройства не превысит $200 \text{ }^\circ\text{C}$, что в свою очередь не нарушает целостности [30] и прочностных свойств проводника, а также не вызывает изменений в структуре ферромагнитной ленты [33, 34]. Важно отметить тот факт, что здесь не учитывается воздушное охлаждение, которому будет подвергаться устройство из-за его установки на открытом пространстве подстанции, что также будет снижать как начальную температуру устройства в нормальном режиме работы, так и его температуру при повышенном тепловом воздействии.

При воздействии прямых грозовых импульсов в связи с тем, что основным проводником высокочастотных импульсов будет в основном ферромагнитный слой, именно его необходимо учитывать в первую очередь. Тогда площадь проводника можно оценить, зная диаметр провода (для проводника А-150 площадь поперечного сечения составляет 150 мм^2) и толщину ферромагнитного слоя. Теперь можно рассчитать степень нагрева ферромагнитного материала под действием различных токов молнии. Полученные скорости повышения температуры для наиболее значимых значений токов молнии (I_m) [35] представлены в табл. 4:

Как видно, нагрев ферромагнитного слоя даже под воздействием тока 100 кА незначителен при длительности грозового импульса около 50 мкс. Используемый ферромагнитный материал (5БДСР) допускает длительный нагрев до $240 \text{ }^\circ\text{C}$ без изменения своих свойств [33, 36].

Получается, что под воздействием коротких импульсов и импульсов обратного перекрытия,

имеющих длительность существенно меньше полного грозового импульса, нагрев провода ЧЗУ станет еще более незначительным, и не будет вызывать изменений свойств под воздействием температуры ни проводника, ни ферромагнитного материала.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе рассчитано влияние частотно-зависимого устройства с различными параметрами на эффективность подавления высокочастотных перенапряжений. В данном случае моделирование проводилось на подстанции с кабельной вставкой и нестандартной конструкцией: ВЛ 35 кВ на опорах, рассчитанных на 110 кВ.

Из расчетной осциллограммы видно, что для подавления наведенного перенапряжения достаточно ЧЗУ с сопротивлением 200 Ом и индуктивностью 2 мГн, и можно предположить, что дальнейшее увеличение сопротивления и индуктивности для данного типа ВЛ не имеет смысла.

В общем случае сопротивление устройства на грозовых частотах (200–300 кГц) для эффективной работы устройства должно превышать 50 Ом, а индуктивность должна быть больше 1 мГн.

Следует иметь в виду, что расчеты являются ориентировочными, так как, несмотря на принятие мощности силового оборудования в соответствии с нормативными документами, она может отличаться от подстанции к подстанции даже типового исполнения. Поэтому расчет желательно проводить непосредственно для каждой подстанции, учитывая реальные параметры схемы в каждом конкретном случае.

Можно отметить, что проблема защиты кабельных вставок от высокочастотных перенапряжений, причем не только при грозовых, но и при воздействии коммутационных перенапряжений, например, при работе вакуумных выключателей, является актуальной [37].

По результатам расчетов показаны способы коррекции индуктивности, которые позволят увеличить время нарастания импульса и тем самым вместе с активным сопротивлением сильнее его деформировать и сделать безопасным для оборудования подстанции (включая кабельную вставку).

Так, изменяя длину провода, можно изменять индуктивность ЧЗУ и его активное сопротивление. Следует отметить, что увеличение количества витков в 4 раза (с 15 до 60) приводит к увеличению индуктивности более чем в 7 раз (с 309 до 2274 мкГн).

Таблица 4. Скорость роста температуры в ферромагнитном слое для проводов А-150 (110 кВ)

I_{M2} , кА	10	20	30	50	100
dT/dt (110 кВ), К/с	213	851	1914	5316	21265

При этом приращение индуктивности превышает скорость роста длины катушки и скорость роста веса. Так, увеличение количества витков (с 30 до 45) приводит к увеличению индуктивности более чем на 75% (с 880 до 1561 мкГн).

Также рассматривались возможные изменения диаметра устройства и количества витков при сохранении длины. Показано, что оптимальным размером будет 1000 мм, так как он является стандартным для аналогичного оборудования (например, для заградителя), то есть он оптимален для большинства случаев. Но при необходимости можно увеличить диаметр устройства и больше, но это не принесет выигрыша в индуктивности.

Тип изоляции (литая или с постоянной толщиной) не оказывает существенного влияния на индуктивность при малом диаметре катушки.

Также был проведен расчет теплового воздействия на катушки ЧЗУ при установке в линию 110 кВ, который показал, что существенного нагрева устройства и влияния на его характеристики не будет. Это также подтверждается аналогичными исследованиями, указывающими на то, что нагрев до температур рекристаллизации может улучшить некоторые качества ферромагнитного слоя [38–40]. Была выявлена проблема отсутствия требований к термической стойкости ЧЗУ, поэтому результаты расчета были сопоставлены с техническими условиями на ВЧ-заградитель. Это свидетельствует о необходимости разработки нормативной документации на ЧЗУ в целом и в области термической стойкости в частности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно резюмировать, что при размещении ВЛ с номинальным напряжением 35 кВ в каркасе ВЛ 110 кВ могут возникнуть значительные перенапряжения, которые потенциально опасны для оборудования подстанции.

Использование ЧЗУ в качестве средства защиты от крутых фронтов высокочастотных перенапряжений при последовательном включении его с защищаемым объектом может быть эффективным, особенно в случаях, когда невозможно применение традиционных средств защиты. В дальнейшем планируется проведение моделирования импульсов обратного перекрытия, как наиболее опасных и разрушительных воздействий для виткового оборудования.

Параметры ЧЗУ зависят от конфигурации сети, длины кабельной линии и должны уточняться для конкретной электроподстанции по результатам расчетов и моделирования. Однако в первом приближении расчетные параметры ЧЗУ, при которых устройство будет эффективно подавлять высокочастотные перенапряжения, можно принять следующими (на грозовых частотах 300 кГц): $R = 100\text{--}150$ Ом, $L = 1\text{--}1,5$ мГн.

Расчетные зависимости индуктивности от числа витков и размаха катушки могут быть полезны для настройки оптимальных параметров ЧЗУ, эффективных при защите изоляции. Также эти параметры позволяют оценить размер ЧЗУ, что важно при проектировании устройства на соответствующее номинальное напряжение.

Необходимо разработать нормативную документацию по требованиям к термостойкости разрабатываемого оборудования, например, частотно-зависимого устройства. Это позволит напрямую оценить влияние возможного нагрева на ЧЗУ, а не через сравнение другого устройства с аналогичной конструкцией.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была выполнена в рамках проекта «Приоритет 2030».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Jinliang, H., Wang, X., Yu, Z. and Zeng, R., Statistical analysis on lightning performance of transmission lines in several regions of China, *IEEE Trans. Power Del.*, 2015, vol. 30, p. 1543. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2363122.
- Yi-chong, X., The search for high power in China: State Grid Corporation of China. *Policy, Regulation and Innovation in China's Electricity and Telecom Industries*, 2019, p. 221. <https://doi.org/10.1017/9781108645997.006>
- Shivanand, V., Hegde, V. and Kumar, U., On the influence of neighboring conducting objects on the induced currents in simple down conductors due to nearby lightning strike, *Electr. Power Comp. Syst.*, 2012, vol. 40, no. 14, p. 1533. <https://doi.org/10.1080/15325008.2012.707286>
- Mahmood, F., Rizk, M., Lehtonen, M. and Kazmirchuk, S., Risk-based insulation coordination studies for protection of medium voltage overhead

- lines against lightning-induced overvoltages, *Electr. Eng.*, 2019, vol. 101, p. 311. <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00783-z>
5. De Oliveira-De Jesus, P., Amaya, J., Acevedo, A. and Urdaneta, A., Optimization of overhead transmission lines insulation and grounding costs with respect to back flashover rate, *Electr. Eng.*, 2021, vol. 103, p. 2887. <https://doi.org/10.1007/s00202-020-01180-7>
 6. Hayashi, T., Mizuno, Y. and Naito, K., Study on transmission-line arresters for tower with high footing resistance, *IEEE Trans. Power Del.*, 2008, vol. 23, no. 4, p. 2456. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917892>
 7. Florkowski, M., Furgal, J., Kuniewski, M. and Pajak, P., Propagation of lightning, oscillating and non-standard impulse waveforms in transformer windings, *Proc. 21st Int. Symp. on High Voltage Engineering (ISH 2019). Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, vol. 598, p. 1254. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31676-1_117
 8. Adamian, Y.E., Krivosheev, S.I., Korovkin, N.V., Monastyrsky, A.E., et al., Dependence of overvoltage level of different voltage class surge arrestors on grounding device parameters. Experimental study and simulation, *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf. (APPEEC)*, 2016, p. 1888. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2016.7779817>
 9. Shein, D. and Etzion, N., Protection of indoor SF6 substations against lightning overvoltages in hybrid overhead/underground medium voltage networks, *The 22nd Convention on Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 2002, p. 41. <https://doi.org/10.1109/EEEI.2002.1178311>
 10. Hosseini, S.A., Mirzaie, M. and Barforoshi, T., Impact of surge arrester number and placement on reliability and lightning overvoltage level in high voltage substations, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2015, vol. 65, p. 146. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.037>
 11. Piantini, A., Duarte, D.M. and Romero, F., Lightning overvoltages on rural distribution lines, *Int. Conf. on High Voltage Engineering and Application*, 2008, p. 63. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2008.4773874>
 12. Paolone, M., Nucci, C.A., Petrace, E. and Rachidi, F., Mitigation of lightning-induced overvoltages in medium voltage distribution lines by means of periodical grounding of shielding wires and surge arresters: modelling and experimental validation, *IEEE Trans. Power Del.*, 2004, vol. 19, no. 1, p. 423. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.820196>
 13. McDermot, T.E., Short, T.A. and Anderson, J.G., Lightning protection of distribution lines, *IEEE Trans. Power Del.*, 1994, vol. 9, no. 1, p. 138. <https://doi.org/10.1109/61.277688>
 14. Borisov, R.K., Smirnov, M.N., Goldun, A.V. and Tikhonov, Yu.V., An experimental study of high-frequency overvoltage spikes, *Russ. Electr. Engin.*, 2021, vol. 92, p. 181. <https://doi.org/10.3103/S1068371221040027>
 15. Гашимов, А.М., Мехтиев, Т.Р., Бабаева, Н.Р., Возможности ограничения высокочастотных перенапряжений при использовании частотно-зависимого резистора, *Int. Conf. Energy of Moldova – 2005*, Кишинев, 21–24 сентября 2005, с. 265.
 16. Emelyanova, O.O., Loman, V.A. and Korobeynikov, S.M., Lightning overvoltages suppression for the 35-kV cable section insulation with the frequency-dependent device, *2021 XV Int. Sci.-Techn. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, 2021, p. 212. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647458>
 17. Korobeynikov, S.M., Loman, V.A., Ridel, A.V., Emelyanova, O.O., et al., High-current measurement of FDD layouts, *IEEE 23 Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) to the 100th anniversary of the legendary NETI rector Georgy Lyschinsky*, Erlagol, 2022, p. 471. <https://doi.org/10.1109/EDM55285.2022.9855101>
 18. Korobeynikov, S.M., Krivosheev, S.I., Magazinov, S.G., Loman, V.A., et al., Suppression of incoming high-frequency overvoltage in transformer coils, *IEEE Trans. Power Del.*, 2021, vol. 36, no. 5, p. 2988. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3031592>
 19. Karki, U., Gunasekaran, D. and Peng, Z.F., Reactive compensation of overhead AC transmission lines using underground power cables, *IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA*, 2015, p. 1. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7285628>
 20. Li-Ming, Zhou and Boggs, S.A., Effect of shielded distribution cables on lightning-induced overvoltages in a distribution system, *IEEE Trans. Power Del.*, 2002, vol. 17, no. 2, p. 569. <https://doi.org/10.1109/61.997940>
 21. Tarko, R., Gajdzica, J., Nowak, W. and Szpyra, W., Study of the lightning overvoltage protection effectiveness of high voltage mixed overhead cable power lines, *Energies*, 2021, vol. 14, art. ID 2329, <https://doi.org/10.3390/en14082329>
 22. Hoogendorp, G., Popov, M. and van der Sluis, L., Lightning induced overvoltages in mixed 380 kV OHL-cable-OHL connections, *Int. Conf. on Power System Transients (IPST2013)*, Vancouver, Canada, 2013, p. 1. <https://doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884262>
 23. Orsagova, J. and Toman, P., Transient overvoltages on distribution underground cable inserted in overhead line, *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, Prague, Czech Republic, 2009, p. 1.
 24. Duan, X., Tang, M., Lin, F. and Ye, H., Analysis on the breakdown of main insulation on the middle joint of 220 kV power cable, *High Voltage App.*, 2009, vol. 45, no. 6, p. 142.

25. Burlakov, E.S., Evdokunin, G.A. and Karpov, A.S., Transient processes and overvoltages in high-voltage single-phase cable lines, *IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia, 2017, p. 260. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2017.7910543>
26. Yang, G., Huang, Z., Yao, L., Jia, T., et al., *The overvoltage of hybrid transmission line of long distance ultra-high voltage cable and overhead line*. 2020, p. 28. <https://doi.org/10.1109/AEES48850.2020.9121503>
27. Lavrov, Y.A., Korobeynikov, S.M. and Petrova, N.F., Protection of cables with XLPE insulation from high-frequency overvoltages, *2016 11th Int. Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Novosibirsk, Russia, 2016, p. 334.
28. Abdulahovic, T., *Analysis of high-frequency electrical transients in offshore wind parks*. PhD Thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.
29. Кадомская, К.П., Лавров, Ю.А., Рейхердт, А.А., *Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них*. Учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 319 с.
30. Weaver, R., *The Inductance of a Helix of Any Pitch*, 2011. <https://electronbunker.ca/DLpublic/HelicalInductance.pdf>
31. СТО 56947007-29.060.10.075-2011 Типовые технические требования к самонесущим изолированным и защищенным проводам на напряжение до 35 кВ, стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС»
32. ТУ 14-123-149-2009 Технические условия. Лента быстрозакаленная из магнитомягких аморфных сплавов и магнитомягкого композиционного (нанокристаллического) материала. ОАО "АМЗ". г. Аша. 2009. 17 с.
33. СТО 56947007-33.060.40.125-2012 Общие технические требования к устройствам обработки и присоединения каналов ВЧ связи по ВЛ 35-750 кВ, стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС».
34. Ануриев, В.И., *Справочник конструктора-машиностроителя*. Т. 1. М.: Машиностроение, 2006. 928 с.
35. Rakov, V.A. and Mareev, E.A., Statistical distributions of lightning parameters with emphasis on their extremely high values, *Elektrichestvo*, 2021, no. 3, p. 4. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-3-4-25>
36. Гойхенберг, Ю.Н., Рошин, В.Е., Ильин, С.И., Особенности кристаллизации и формирования магнитных свойств аморфных сплавов при нагреве, *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*, 2016, т. 16, № 3, с. 134.
37. Vojtovich, R.A., Lavrov, Y.A., Petrova, N.F. and Tolstobrova, L.I., Electromagnetic compatibility of vacuum circuit breakers with electrical equipment of medium voltage, *2018 XIV Int. Sci.-Techn. Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, Russia, 2018, p. 483. <https://doi.org/10.1109/APEIE.2018.8546295>
38. Golubev, V.A., Strikanov, A.V., Potemkin, G.A., Zueva, L.V., et al., Analysis of the samples of Fe-Cu-Nb-Si-B amorphous alloys obtained by dynamic compacting method, *MRS Online Proc. Library*, 2005, vol. 903, art. ID 510. <https://doi.org/10.1557/PROC-0903-Z05-10>
39. Карасев, В.В., Макаров, В.А., Филиппов, А.Е., Маркин, В.В., Электромагнитные характеристики нового нанокристаллического сплава 5БДСР и возможности его применения в электромагнитных устройствах, *Электротехника*, 1994, № 4, с. 51.
40. Shurygina, N.A., Glezer, A.M., Permyakova, I.E. and Blinova, E.N., Effect of nanocrystallization on the mechanical and magnetic properties of finemet-type alloy ($\text{Fe}_{78.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$), *Bull. Russ. Acad. Sci. Physics*, 2012, vol. 76, p. 44. <https://doi.org/10.3103/S1062873812010261>

Summary

The article considers the issue of protecting substation equipment and overhead lines from high-frequency lightning surges using a device based on a nanocrystalline tape made of an amorphizing alloy. The object of protection is a substation that uses a cable insert between the overhead line and the substation input. A distinctive feature is the fact that the 35 kV overhead line is made on poles for 110 kV overhead lines. A high danger of surges is shown with such a configuration of the overhead line, which includes a cable insert. A method for protecting against high-frequency surges is proposed using a device operating on the use of an anomalous skin effect – a frequency-dependent device, due to the presence of a ferromagnetic material applied to the conductor. The device significantly increases its active resistance when passing high-frequency signals. It is shown that the use of a frequency-dependent device makes the incident high-frequency pulse safe for both the turn insulation and the insulation of the cable insert. The issue of changing the dimensions of the protective device for selecting the necessary parameters of resistance and inductance is considered. The issue of thermal stability is also touched upon in connection with the use of ferromagnetic material in the design of a frequency-dependent conductor. It is shown that under the action of lightning over-voltages and short-circuit currents, destruction of the material or changes in its properties will not occur. The results presented in the article will allow the use of a new device for protection against high-frequency lightning over-voltages, as well as improving its design for specific technical requirements.

Keywords: lightning over-voltages, short impulses, overhead power lines, cable lines, frequency-dependent device, thermal impact