

# **Разработка частотнозависимого устройства для ВЛ 35 кВ для защиты от высокочастотных перенапряжений**

Ломан В.А., ассистент, м.н.с.

Коробейников С.М., д.ф-м.н., профессор

Ридель А.В., к.т.н., ассистент

Новосибирский Государственный Технический Университет

## **Аннотация**

В работе проведено сравнение результаты низковольтных и импульсных испытаний образцов ЧЗУ с различной конструкцией проводников. Были исследованы образцы ЧЗУ с круглым проводником, плоским многослойным проводником, прямоугольным проводником. Результаты показали перспективность применения прямоугольного проводника в качестве основы ЧЗУ, для повышения эффективности подавления грозовых импульсов.

## **Ключевые слова**

Высокочастотные перенапряжения, трансформаторы, скин-эффект, частотно-зависимые устройства, витковые замыкания, низковольтные измерения, импульсные измерения

## **Актуальность.**

Из всех объектов электроэнергетики, воздушные линии имеют наибольшую протяжённость, в связи с чем, они наиболее подвержены ударам молний. При этом большая протяжённость воздушных линий накладывает трудности на обеспечение надёжной грозоупорности воздушных линий. Особенно актуально для районов с высоким сопротивлением грунта, таких, например, как районы Крайнего Севера, где кроме большой протяжённости и высокого сопротивления грунта, также имеется фактор труднодоступности для осуществления ремонтных и профилактических работ на воздушных линиях, что не способствует повышению надёжности систем защиты от перенапряжений [1].

Актуальность проблемы защиты от грозовых воздействий подтверждается большим количеством отключений и повреждений оборудования под действием грозовых перенапряжений. Так, например, по данным предоставленным Красноярскэнерго, за 2014-2020 года, большое количество различных технологических нарушений (ТН), более двухсот, были вызваны по причине «атмосферные перенапряжения» на воздушных линиях 35-110 кВ.

Похожая картина наблюдается и в энергосетях ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Юга. На рисунке 1, показаны причины повреждений воздушных линий 10 - 110 кВ за период 2014-2020 год. На рисунке представлена информация только по причинам, выявленным более 10 раз за все 7 лет контроля.

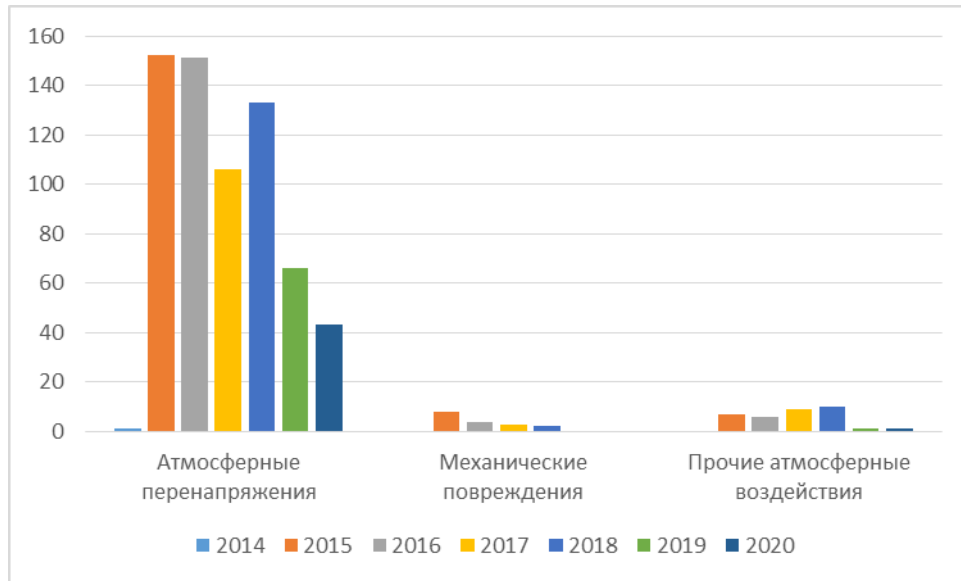


Рисунок 1– Основные причины повреждений ВЛ 10-110 кВ, за 2014-2020 года.

На представленных рисунках показаны лишь основные повреждения повреждаемое грозовыми воздействиями. Всего же, в энергосетях Юга за 2014-2020 было зафиксировано более 965 случаев выхода из строя оборудования по причине «атмосферное перенапряжение (гроза)» из 1018, что составляет почти 95 % выходов из строя от общего числа.

Важно отметить, показана статистика по регионам с развитой транспортной системой и с малым удельным сопротивлением грунта (от 10 – 1000 Ом). В регионах с высоким сопротивлением грунта (более 10 000 Ом) и слаборазвитой логистикой (регионы Крайнего Севера, горные районы) ситуация многократно хуже [2, 3].

Наибольшую опасность, для продольной изоляции трансформаторов, представляют срезанные волны большой крутизны за счёт мгновенного скачка напряжения на витках обмоток [4], при этом влияние могут оказывать как волны с большой амплитудой, так и с малой.

В нормативных документах делается примечание что при использовании обычных средств измерения длительность среза и его крутизна не могут быть определены с достаточной степенью точности. Однако даже приблизительные оценки крутизны, по формам сигналов, дают крутизну на порядок больше, чем ожидаемая по нормативным документам [2], что лишний раз говорит о высокой опасности крутых и срезанных волн.

При этом при отсутствии защитных устройств, наибольшему воздействию подвергается силовые трансформаторы, а именно концевые витки обмотки

трансформаторов. Из-за высокой крутизны набегающего импульса в начальные моменты времени всё напряжение концентрируется на нескольких первых витках [5]. Несмотря на то, что межвитковая изоляция концевых витков усилена, она не может быть значительно больше изоляции относительно корпуса (земли). Поэтому могут происходить частичные пробой изоляции обмоток. Дальнейшее воздействие импульсов способствует развитию дефекта и при этом, если он не обнаруживается в начальные стадии, в дальнейшем определение причины может быть затруднено.

Ранее в Новосибирском Государственном Техническом Университете было создано частотно-зависимое устройство для Воздушных линий (ВЛ) 110 кВ, показанное на рисунке 2. Эффективно показавшее себя в ходе опытной эксплуатации [6].



Рисунок 2 – Фото ЧЗУ в высоковольтном зале СибНИИЭ

Однако необходимо отметить, что несмотря на высокую эффективность этих устройств, был выделен ряд моментов, не позволяющих быстрому выходу в широкую эксплуатацию этих устройств: малое омическое сопротивление на высоких частотах, большие габариты, а также отсутствие устройств на другие классы напряжений (например, 35 кВ). В связи с этим, встал вопрос о улучшении эксплуатационных и технических характеристик ЧЗУ. В качестве одного из наиболее перспективных способов было предложено изменение формы частотно-зависимого проводника.

#### **Цель исследования**

Провести оценку влияния формы проводника на эффективность подавления высокочастотных перенапряжений

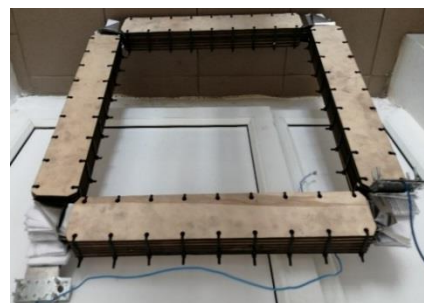
#### **Экспериментальный образы**

Для проведения экспериментов были изготовлены несколько макетов ЧЗУ (Рисунок 3):

- образец ЧЗУ с круглым проводником, представляет собой катушку с 6 витками (а) с проводом А-95 (для ВЛ 35 кВ) с нанесённым на него слоем ферромагнитной ленты 5БДСР;
- образец ЧЗУ с плоским многослойным проводником представляет собой плоскую катушку с 6 витками с многослойным алюминиевым проводником (рисунок **Error! Reference source not found.** а). Проводник представляет собой слои алюминиевой фольги, между слоями которой расположен слой ферромагнитной ленты. Плоскость проводника располагается перпендикулярно оси катушки (б), так как предыдущие исследования показали, значительный прирост эффективности в данном положении;
- образец ЧЗУ с прямоугольным проводником (в).
- сравнительный образец для проверки гипотезы о ВЧЗ представляет собой провод А-95, смотанный в катушку 6-ю витками (г), также имеет расстояние между витками 6 мм.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – образцы ЧЗУ: а) образец ЧЗУ с круглым проводником; б) образец ЧЗУ с плоским многослойным проводником; в) образец ЧЗУ с прямоугольным проводником; г) образец «ВЧЗ».

### Низковольтные измерения

Для проведения низковольтных измерений применялась схема, показанная на рисунке 4. Схема измерения состояла из генератора сигналов, измеряемого макета,

низкоиндуктивного шунта и осциллографа. В качестве источника высокочастотных сигналов применялся генератор SFG-2010.

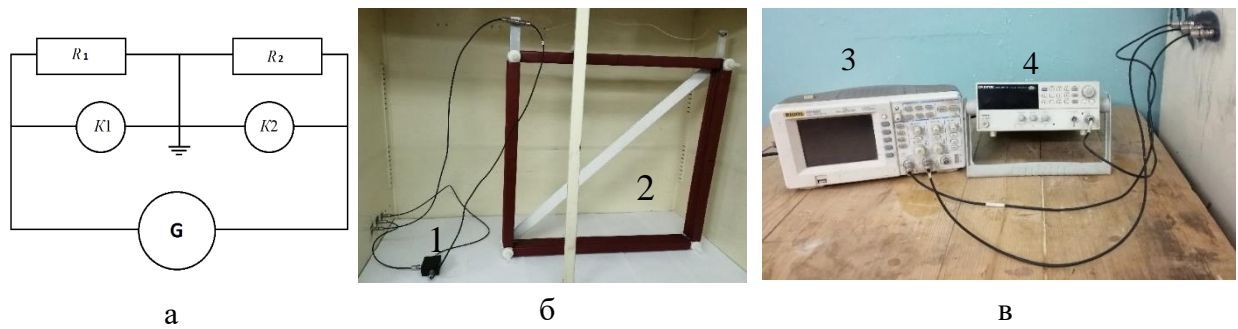


Рисунок 4 – Измерительная установка: а – принципиальная схема ( $R_1$ ,  $R_2$  – низкоиндуктивный шунт и измеряемый макет,  $K_1$ ,  $K_2$  – щупы осциллографа,  $G$  – генератор высокочастотного сигнала); б – измерительная установка измерительном шкафу (1 – низкоиндуктивный шунт, 2 – макет ЧЗУ); в - измерительная установка вне шкафа (3 – осциллограф DS11022С, 4 – генератор сигналов SFG 2010)

Измерения проводились в диапазоне частот от 100 кГц до 1МГц, с шагом 100 кГц.

Полученные результаты представлены на рисунке 5.

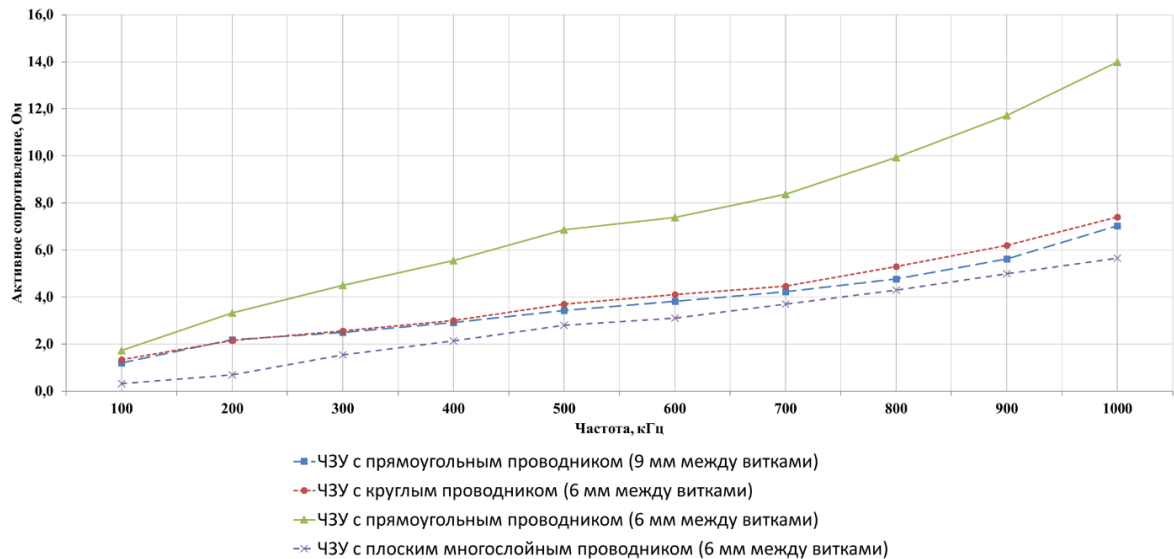


Рисунок 5 – Активное сопротивление макетов ЧЗУ

### Импульсные измерения

Вторым этапом проводились импульсные эксперименты. Для импульсных экспериментов применялась следующая схема измерения, состоящая из двух электрических цепей с общим элементом:

- одна заряжающая, состоящая из последовательно соединённого источника постоянного тока, ключа  $K_1$  и конденсатора  $C_0$ ;
- вторая измерительная, состоящая из конденсатора  $C_0$ , ключа  $K_2$ , шунта  $R_{ш}$  (0,2 Ом) и испытываемого образца ЧЗУ имеющего сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  (рисунок 6).

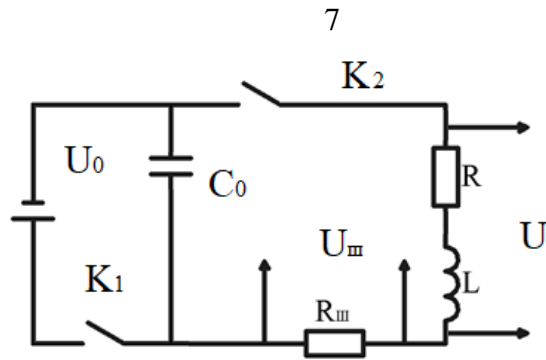


Рисунок 6 – Принципиальная схема импульсных измерений

Для измерения использовались керамические конденсаторы различными номиналами ёмкостей. Различный номинал позволял добиться различных частот создаваемого импульса. Частота образующегося импульса в системе зависит от включённых в цепь элементов и была различна для каждого образца. Ниже приведены номиналы использованных ёмкостей и соответствие полученных частот входных сигналов для каждого из образцов (таблица 1).

Таблица 1 – Номиналы ёмкостей и соответствие частоты входного сигнала.

| C               | 2 мкФ | 1 мкФ | 680 нФ | 100 нФ | 47 нФ | 33 нФ | 22 нФ | 10 нФ |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Круг. ЧЗУ, кГц  | 10    | 15    | 23     | 63     | 91    | 111   | 143   | 200   |
| Круг. ВЧЗ, кГц  | 19    | 27    | 35     | 83     | 125   | 149   | 189   | 250   |
| Плоск. ЧЗУ, кГц | 44    | 73    | 100    | 278    | 435   | 526   | 667   |       |

На рисунке 7 представлены зависимости активного сопротивления от частоты после обработки результатов измерений.

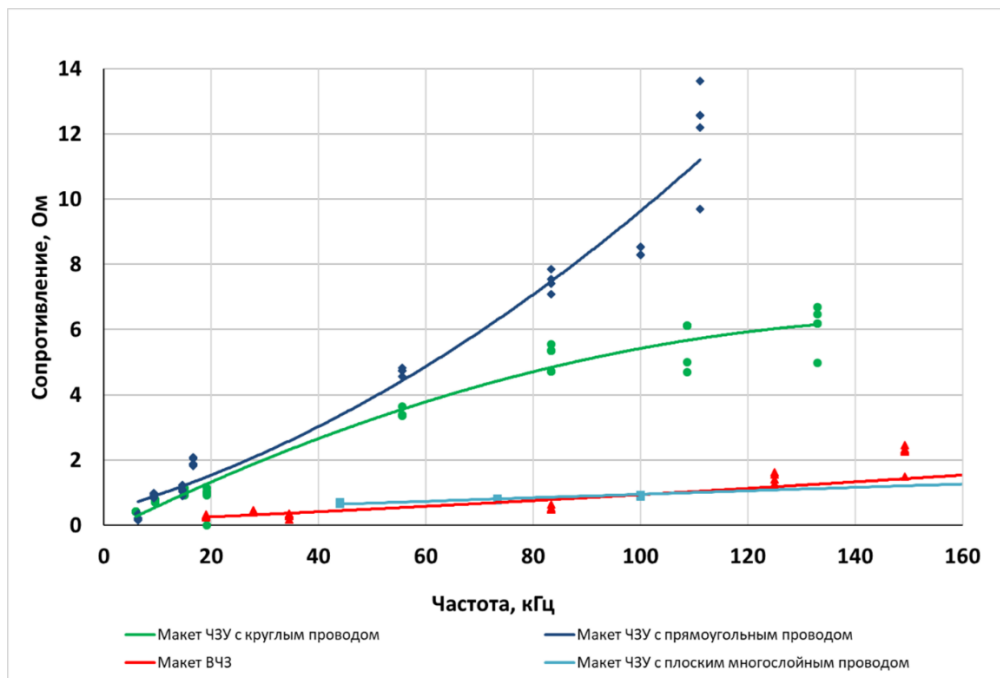


Рисунок 7 – Сопротивление образцов на различных частотах

### **Обсуждение результатов**

В результате низковольтных испытаний видно, что на всём диапазоне частот образец ЧЗУ с прямоугольным проводником, с расстоянием между витками 6 мм, имеет большие показатели активного сопротивления, чем образец ЧЗУ с круглым проводом, примерно на 18 - 20 % на частотах 200-300 кГц, и с ростом частоты сигнала разница растёт до 50 %. При этом образец ЧЗУ с плоским многослойным проводником не показал себя лучше ЧЗУ с круглым проводником.

Результаты импульсных измерений показывают, при данной конструкции ЧЗУ с плоским многослойным проводом значительно уступает в эффективности ЧЗУ с круглым проводом, а ЧЗУ с круглым проводом уступает по эффективности ЧЗУ с прямоугольным проводником. При этом заметен интенсивный рост активного сопротивления при увеличении частоты, что позволяет ожидать значительного прироста активного сопротивления на грозовых частотах (200-300 кГц) и выше.

Также следует отметить, что образец «ВЧЗ» не показал себя эффективно в качестве защитной меры. Скорее всего это связано с отсутствием элемента подстройки и с тем, что в эксплуатации ВЧЗ настраиваются под определённый диапазон частот, который и будет задерживаться устройством, при этом совпадение его или пересечение с «грозовым» диапазоном носит случайный характер.

### **Заключение**

Данная работа показывает, что применение прямоугольного проводника, может значительно повысить эффективность ЧЗУ, при этом имеется возможность сократить также размер, как минимум в вертикальной поверхности (за счёт того, что прямоугольный проводник в вертикальной плоскости в 2 раза уже, чем круглый). Образец же многослойного плоского проводника ЧЗУ не оправдал ожиданий, что авторы связывают с одинаковой шириной проводящего слоя и ферромагнитной ленты.

В дальнейшем планируется проведение сильноточных испытаний проводников, и сборка опытного образца ЧЗУ с прямоугольным проводником для ВЛ 35 кВ.

### **Финансирование**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90101.

### **Список источников**

1. Лысков Ю.И., Антонова Н.П., Максимов В.М., Демина О.Ю. Проблемы применения нелинейных ограничителей перенапряжения 110-750 кВ // Электрические станции, № 9, 1988. С. 43-47.

2. Брыкин В.П. Актуальность грозозащиты продольной изоляции силовых трансформаторов в регионах с грунтами низкой проводимости // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, № 1(8), 2018. С. 38-47.
3. Брыкин В.П., Лопатин В.В., Илюшов Н.Я., Коробейников С.М., Лавров Ю.А., Ломан В.А., Скрябина Е.А. Проблемы грозоупорности линий электропередачи и подстанций в районах Крайнего Севера // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, № 3(6), 2016. С. 30-37.
4. Ефимов Б.В., Селиванов В.Н. Волны перенапряжений на оборудовании подстанции при ударах молнии за пределами защищённого подхода // Труды Кольского научного центра, № 3-16(9), 2018. С. 7-23.
5. Alstom Grid Worldwide Contact Centre. NETWORK PROTECTION & AUTOMATION. Alstom Grid, 2011. 16-3 pp.
6. Протокол Технического совета АО «Тюменьэнерго» на тему: Рассмотрение результатов опытно-промышленной эксплуатации опытных образцов продукции, полученных в результате реализации НИОКР. Секция № 1 ТС АО «Тюменьэнерго»: Композитные опоры ВЛ 35-110 кВ, Частотозависимый резистор. От 12 декабря 2018