

Ж.К.Оржанова<sup>1</sup> , А.А.Боканова<sup>1</sup>, Ж.Н.Исабеков<sup>2</sup>

Евразийский технологический университет, Алматы, Казахстан

Международный казахско-турецкий университет им. Х.А.Ясави, Туркестан, Казахстан

E-mail: zhanar.orzhanova@mail.ru

## АТМОСФЕРНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ И ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам исследования силовых трансформаторов, которые включают оценку эксплуатационной надежности при воздействии на них атмосферных перенапряжений. Приведены распределение грозовой активности на территории Казахстана, рассмотрены волновые процессы, происходящие в обмотках трансформатора и мероприятия для внутренней защиты трансформаторов.

**Ключевые слова.** Атмосферные перенапряжения, силовые трансформаторы, волновые процессы, распределение напряжения.

### Введение.

Обеспечение надежности снабжения потребителей электрической энергией и ее качества являются приоритетной задачей энергетики. Силовые трансформаторы (СТ), относятся к основному оборудованию эксплуатируемых на электростанциях и в электрических сетях, параметры которых определяют режимы работы всей энергосистемы. Поэтому актуальной является проблема исследования влияния атмосферных перенапряжений на параметры и эксплуатационную надежность трансформаторов.

Разряды молнии вызывают атмосферные перенапряжения представляющих опасность для стабильного функционирования энергосистемы. При непосредственном попадании молнии в объект говорят о перенапряжениях, обусловленных прямым ударом молнии (ПУМ), если вблизи него – индуктированных перенапряжениях. Наибольшие грозовые перенапряжения наблюдаются при ПУМ в линию или в открытое распределительное устройство (ОРУ). Переносимый молнией заряд может вызывать перенапряжения свыше миллиона вольт при длительности до 100 мкс, что является опасным для оборудования любого номинального напряжения и приводит к аварийным отключениям, пожарам из-за внутренних повреждений трансформатора или выбросов масла. Атмосферные перенапряжения приводят к повреждению главной и витковой изоляции при ограниченных запасах их электрической прочности, вызывают диэлектрические повреждения и короткие замыкания в трансформаторах (рисунок 1).



Рисунок 1 – Повреждения в силовых трансформаторах

Основная часть силовых трансформаторов в Казахстане отработали нормативный срок эксплуатации 25 лет (ГОСТ 11677-85) [1]. Аварийные отключения или отказы в работе наносят существенный ущерб при передаче электрической энергии, т.к. стоимость одного силового трансформатора в среднем составляет 1 250 000 тенге, а с демонтажем поврежденного трансформатора, транспортными расходами, с работами по восстановлению и монтажа нового – 12 500 000 тенге, поэтому необходимо проводить своевременную диагностику различными методами трансформаторов на базе инновационных достижений.

### Материалы и методы.

*Влияние грозовой деятельности на работу энергообъектов.* Интенсивность грозовой деятельности для определенной территории характеризуется:

– средним числом грозовых часов в году  $D_z n_{год} = n_{год} \frac{l}{100} \cdot \frac{D_z}{100}$ ;

– средним числом ударов молнии  $n_{уд}$  в 1 км<sup>2</sup> площади земли за 100 грозовых часов.

Для подстанции  $n_{уд}$  для определенного участка по длине  $A$ , ширине  $B$  и высоте  $H$  выражается:  $n_{уд} = 6,7 \cdot (A + 7H) \cdot (B + 7H) \cdot 10^{-6}$ .

Среднегодовая продолжительность гроз для конкретного региона областей Казахстана находится по карте (рисунок 2) [2] либо утвержденными по отдельным областям территориальных карт длительности гроз, а также значениям среднестатистических показателей метеостанции, расположенных вблизи от места нахождения линии электропередачи (ЛЭП) и открытых распределительных устройств (ОРУ).

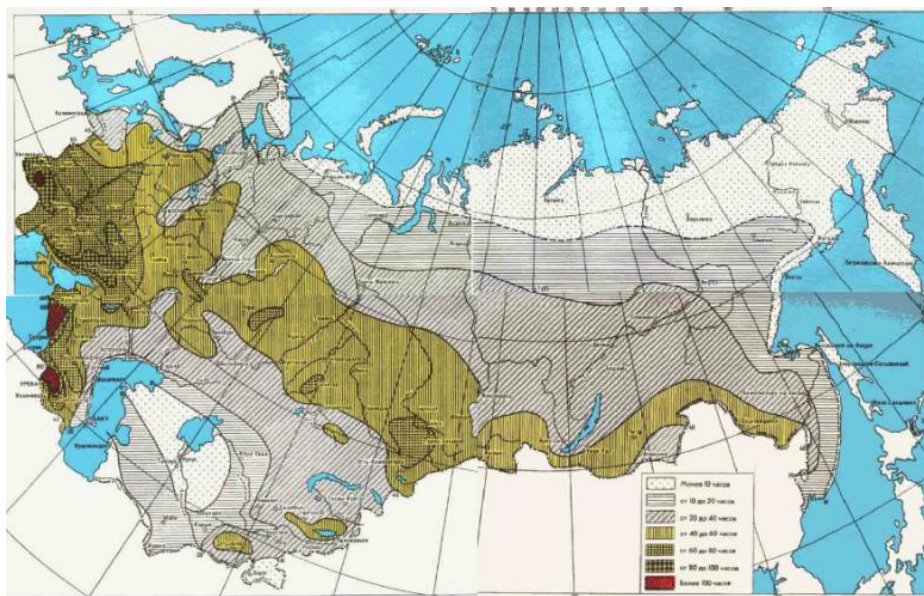


Рисунок 2 – Карта грозовой активности для регионов Казахстана

Представление о распределении грозовой активности по регионам с учетом атмосферной циркуляции, рельефа, влажности-температурных характеристик видно на карте. Согласно этим данным на территории Казахстана число дней с грозой составляет от 5 до 10 в год, со средней суммарной продолжительностью гроз от 10 до 50 часов за год, при этом с увеличением широты уменьшается грозовая активность.

Из таблицы СП РК 2.04-103-2013  $D_z$  по наблюдениям метеостанции Казахстана приведены ниже.

*Алматинская область:* 45,4 – Нарынкол; 44,5 – Жаланащ; 42,4 – Алматы; 33,6 – Узынагаш; *Восточно-Казахстанская область:* 34,2 – Катон-Карагай; 30,9 – Усть-Каменогорск; 29,8 – Селезневка; *Южно-Казахстанская область:* 32,1 – Тасарык; 27,8 – ауыл Турара Рыскулова; 18,4 – Шымкент; *Акмолинская область:* 26,1 – Степногорск; 25,1 – Атбасар; 23,3 – Коргалжын; *Западно-Казахстанская область:* 25,5 – Январцево; 22,4 – Аксай; 19,4 – Уральск; *Северо-Казахстанская область:* 25,3 – Сергеевка; 22,5 – Золотая Нива; 22,1 – Рузаевка; *Карагандинская область:* 25,8 – Каркалинск; 25,3 – Бектауата; 23,0 – Караганда; *Жамбылская область:* 22,9 – Мерке; 22,5 – Отрар; 18,4 – Кордай; *Павлодарская область:* 24,7 – Баянауыл; 23,9 – Актогай; 22,8 – Павлодар; *Костанайская область:* 24,2 – Пресногорьковка; 23,6 – Железнодорожный СВХ; 21,5 – Рудный; *Актюбинская область:* 22,0 – Актюбе; 21,0 – Ильинский; 20,0 – Темир; *Атырауская область:* 12,4 – Махамбет; 11,4 – Сагиз; 10,4 – Карабау; *Кызылординская область:* 12,3 – Аральское море; 8,1 – Кызылорда; 8,1 – Джусалы; *Мангистауская область:* 11,3 – Кызан; 5,7 – Аккудук; 5,0 – Актау.

Разряды молнии в Казахстане наносят экономический ущерб объектам энергетики, связи, кабельным магистралям (КМ), системам сигнализации на железных дорогах, вызывают пожары. При проектировании и строительстве этих объектов нормативами не предусматривается детальное изучение геологии, а грозозащита рассчитывается по усредненным данным грозовой активности по республике.

Для произвольного пункта любого региона страны  $n_{уд}$  определяется исходя из  $D_2$  по таблице 1 [2].

Таблица 1 – Показатели грозовой активности

<i>Среднее значение годовой длительности гроз, ч.</i>	<i>Относительная концентрация ударов молнии на территорию n, 1/км<sup>2</sup></i>
9-19	1
19-39	2
39-59	4
59-79	5,5
79-99	7
99 и более	9,5

За весь период эксплуатации ЛЭП и ОРУ, для анализа деятельности энергообъектов должна быть предоставлена информация по отключению и повреждению объектов от ударов молнии, выявлены места, наиболее часто повреждаемые их разрядами, соответствовать значениям принятых в руководствах по защите объектов.

В России и за рубежом [3] за последние 20 лет достигнуто значимое развитие в области наблюдений за прохождением грозových фронтов на основе непрерывной и детальной информации о грозовой деятельности над обширными территориями, что обеспечивает ПСМГ (многопунктовая пеленгационная и разностно-дальномерная система местоопределения гроз).

ПСМГ делает возможным регистрацию грозových разрядов всех типов, выделять с вероятностью до 80% разряды в землю и определять их местоположение с точностью до 300 м, определять координаты грозových разрядов и их параметры (амплитуду электрической и магнитной составляющих волн, полярность и длительность первой полуволны формы сигнала, длительность переднего фронта, количество повторных ударов и т.д.). Установка таких систем в Казахстане позволит получать достоверную информацию в режиме реального времени прохождении грозových фронтов над всей территории, что имеет важное значение для народного хозяйства страны.

### Результаты и обсуждения.

*Происходящие в обмотках трансформатора волновые процессы.* Низкие значения потенциала электрической устойчивости по отношению к линейной изоляции представляют опасность для силовых трансформаторов подстанций при набегании по ВЛ на РУ грозных волн. Поэтому, возникающие перенапряжения передаются через трансформатор в его нейтраль и на вторичную сторону магнитным и электростатическим образом. Принимая во внимание эти факты, грозные перенапряжения являются угрозой в режиме эксплуатации для изоляции разземляемой нейтрали и вторичной обмотки трансформатора, а также присоединенного к ней оборудования. Теория волновых процессов описывает физические процессы, вызываемые грозными разрядами на электрооборудовании линий и подстанций.

На сегодняшний день возникают сложности и трудности технического характера при регистрации и измерении значения параметров грозных разрядов в силовых трансформаторах, а также подключения делителей напряжения, искажающих переходный процесс. В связи с этим для анализа и исследования грозных перенапряжений используются физические модели, для которых производятся аналитические, численные и инженерные расчеты.

Для описания волновых процессов и влияния значений волн перенапряжений происходящих в обмотках СТ используются схемы замещения, где обмотка представляется в виде элементов катушки (индуктивности) или витка (емкости) [4]. В таких случаях в качестве основных параметров принимаются значения  $\Delta K$  (емкость собственных катушек или витка),  $\Delta C$  (полная емкость по конструкции трансформатора, по НО и магнитопроводом) и  $\Delta L$  (индуктивность, обусловленная самоиндукцией витка и взаимоиндукцию других элементов обмотки). Неизменные величины обмотки  $L_0$ ,  $C_0$ ,  $K_0$  в схеме замещения по рисунку 3 причисленных к протяженности:

$$L_0 = \Delta L n, \quad C_0 = \Delta C n, \quad K_0 = \Delta K / n, \quad (1)$$

где  $n$  – количество составных частей на единицу длины обмотки.

Показатели полной составляющих обмотки:

$$L = L_0 l, \quad C = C_0 l, \quad K = K_0 / l, \quad (2)$$

где  $l$  – длина обмотки от ввода до нейтрали.

Схема замещения необходимая для расчетов и определения распределения напряжения с учетом переходных процессов представляющих прохождение электромагнитных волн по обмоткам СТ приведена на рисунке 4. Из нее видно, что для расчетов можно пренебречь в виду незначительных значения емкостями, определяющим берутся индуктивные сопротивления.

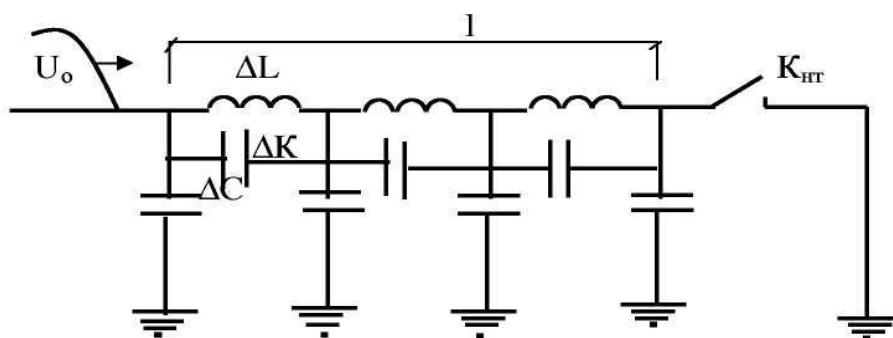


Рисунок 3 – Схема замещения для расчета обмотки СТ



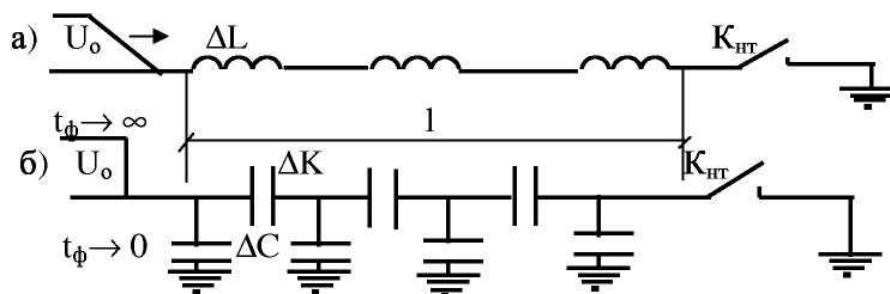


Рисунок 4 – Схемы замещения с учетом переходных процессов в обмотке СТ

При попадании волн, характеризующихся коротким фронтом или высокой частотой на обмотку СТ, значения индуктивных сопротивлений и напряжений достаточно весомые, поэтому эти величины распределяются по емкостным сопротивлениям. Упрощение схем замещения при переходных процессах не вносят погрешностей.

Амплитуда падающей волны  $U_0$  учтена на расчетной схеме рисунка 5 б. Прохождение по обмоткам СТ волн высокой крутизны, дает распределение экстремальных значений напряжений по  $\Delta C$ ,  $\Delta K$  и  $\Delta L$ . Емкость по отношению корпуса СТ на элементе длины обмотки  $dx$  будет равна  $C_0 dx$ , а межвитковая емкость  $K_0/dx$ . Приращение напряжения  $dq$  при общем заряде  $q$  по последовательной схеме соединения сопротивлений определим:

$$q = (K_0 / dx) dq. \quad (3)$$

В случае параллельного соединения сопротивлений производится приращение заряда  $dq$  при общем напряжении  $U$ :

$$dq = C_0 dx U. \quad (4)$$

Дифференцируя уравнения (3) по  $x$  с учетом (4), определим ориентировочное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$(d^2 U / dx^2) - (C_0 / K_0) U = 0, \quad (5)$$

полученное характеристическое уравнение  $\alpha^2 = C_0 / K_0$  содержит корни, определяемые:

$$\alpha_{1,2} = \pm \sqrt{C_0 / K_0}. \quad (6)$$

Решив уравнение (5) с учетом (6) получим:

$$U = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x}, \quad (7)$$

где  $A$  и  $B$  постоянные значения определяемые из начальных условий: при  $X = 0$  (начало обмотки)  $A + B = U_0$ ; при  $X = l$  (конец обмотки)  $Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x} = U_{HT}$ , где  $U_{HT}$  - напряжение нейтрали, в случае режима работы нейтрали заземленной  $U_{HT} = 0$ , при изолированной  $U_{HT} = 0$  или не определена, т.к.  $\alpha x$  незначительно, то из (7) следует, что  $A = 0$ , а  $B = U_0$ .

Кривая первоначального распределения напряжения по обмотке однофазного трансформатора выражается:

$$U_{нач} = U_0 e^{-\alpha x} = U_0 e^{-\alpha \frac{x}{l}}, \quad (8)$$

где  $\alpha l = \sqrt{C_0 l_n / K_0 / l_n} = \sqrt{C / K} = 5 - 20$  - коэффициент, связан с основными параметрами обмотки: при  $> \alpha l$ , крутые изменения напряжения вдоль обмотки трансформатора; при  $< \alpha l$ , пологое распределение первоначального напряжения, ближе к установившемуся  $U_{уст}$ .

Для анализа переходного процесса при заземленной и изолированной нейтральной обмотки однофазного трансформатора воспользуемся рисунком 5 б. Установившееся распределение напряжения по обмотке в случае глухо заземленной нейтрали показано прямой (рисунок 5 а), пролегающей через точки  $U = U_0$  при  $x=0$  и  $U = 0$  при  $x=l$ , а распределение начального напряжения по экспоненте из (8). Начальное  $U_{нач}$  и установившееся  $U_{уст}$  распределенные напряжения вызывают расхождение напряжения или свободную составляющую напряжения  $U_{св}$ , определяемая из потерь в меди обмотки и вихревых токов в магнитоприводе:

$$U_{св} = U_{нач} - U_{уст}. \quad (9)$$

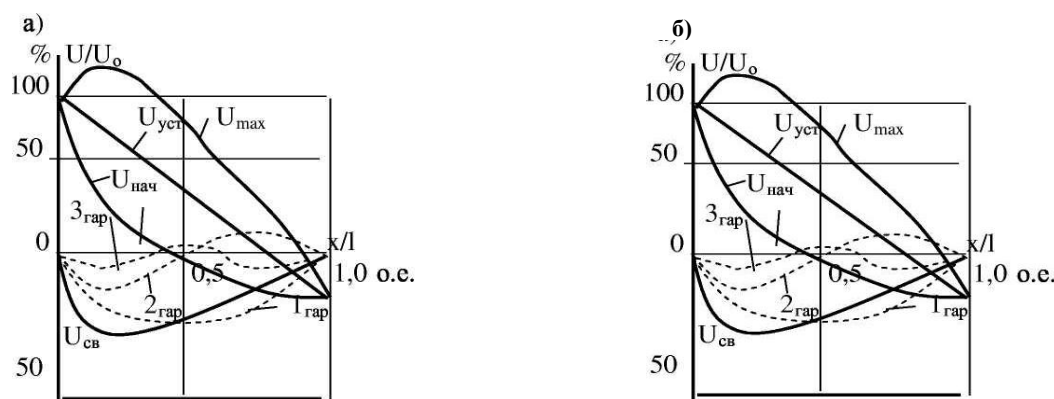
Свободная составляющая напряжения  $U_{св}$  представляется как гармонические колебания (стоячие волны) напряжений высших гармоник по обмотке, с колебанием по определенному значению частоты. Амплитуда гармоники тригонометрического ряда по обмотке трансформатора в случае заземленной нейтралью рассчитывается:

$$A_k = (l / k\pi) U_0 / (l + (K / C)(k\pi)^2), \quad (10)$$

где  $k$  – натуральный ряд чисел и номер гармоники.

В заземленной нейтрали потенциалы возникновения и завершения обмотки установлены по  $U_0$  и 0, при которых свободная составляющая напряжения  $U_{св}$  содержит тем самым узлы, по обмотке располагаются целые числа полувольт натурального ряда гармоник изображенных на рисунке 5 а. Наибольшее распределение перенапряжений по обмотке однофазного трансформатора складывается путем наложения ординат гармоник или суммой ординат распределенной свободной составляющей напряжения  $U_{св}$  и кривой  $U_{уст}$

$$U_{max} = |U_{св}| + |U_{уст}|. \quad (11)$$



глухо заземленная а) и изолированная б) нейтрали

Рисунок 5 – Распределение напряжений в обмотке однофазного трансформатора

Распределение  $U_{\max}$  в однофазных трансформаторах с глухо заземленной нейтралью происходит так, что на начальные катушки обмотки при проникновении крутой волны на ввод воздействует напряжение  $1,25 U_0$  амплитуды падающей волны. Поэтому целесообразно усиление изоляции до значений, выдерживаемых неравномерность распределенного  $U_{\max}$ .

Для изолированной нейтрали рисунка 5 б установившееся напряжение  $U_{уст}$  по обмотке тождественно приложенному напряжению крутой волны  $U_0$  и кривая установившегося напряжения показана прямой линией, параллельно оси абсцисс. Разность между  $U_{уст}$  и распределенным напряжением по обмотке представляется кривой свободного составляющего напряжения  $U_{св}$  по выражению (12) разложенной на гармоники высшего порядка с расчетной амплитудой:

$$A_k = 4 / ((2k - 1)\pi) (U_0 / (l + (K/c)(2k - 1)\pi/2))^2, \quad (12)$$

где  $k$  – натуральный ряд чисел;  $a(2k - 1)$  – номер гармоники.

Для изолированной нейтрали рисунка 5 б узел свободной составляющей, располагается в начале обмотки, а на ее конце расположена пучность, поэтому вдоль обмотки с изолированной нейтралью укладывается нечетное число четвертей волн или нечетные гармоники распределенного свободного напряжения. Поэтому для таких трансформаторов конструктивно усиливают изоляцию по концам обмотки.

Для аналитического определения зависимости максимальных значений перенапряжений на сборных шинах подстанции и на нейтрали обмотки 110 кВ имеющих несколько отходящих линий была использована модель грозоупорного трансформатора типа ТДТГ-25000/110. Последствие перенапряжения в нейтрали силового трансформатора в 1,5-2,0 превосходит значения на сборных шинах, а кратность перенапряжений зависит от числа отходящих линий. Грозовые волны на многофидерных подстанциях приводят к повреждению изоляции нейтрали трансформатора всех классов напряжения. Увеличение длины фронта волны напряжения на линейных концах в диапазонах  $1 \div 40$  мкс при длине ее порядка несколько миллисекунд уменьшает перенапряжения на  $10 \div 20\%$ .

При постоянной длине фронта, с увеличением длины волны кратность перенапряжений возрастает, а также деформация волны.

Для снижения  $U_{\max}$  воздействующих на продольную и главную изоляцию обмоток СТ применяются специальные мероприятия для внутренней защиты трансформаторов [4]:

а) *экранирующие кольца*. Устройство емкостного или экранирующего кольца, присоединенное к началу обмотки (рисунок 6 а) усиливает изоляцию катушек. Электрическое поле выравнивается и снижается градиент напряжения. Изоляция кольца должна сдерживать величину падающего перенапряжения на ввод обмотки трансформатора;

б) *компенсационные экраны*. Компенсация токов, стекающим по емкостям  $C_0$  главной изоляции, приводит к выравниванию кривой  $U_{нач}$ . Это осуществляется с помощью специального металлического экрана (щита), окружающего обмотку ВН, и присоединения его к линейному вводу трансформатора (рисунок 6 б). Такой ток, подтекающий по частичным емкостям  $C_k$ , компенсирует ток, стекающий по емкостям  $C_0$ .

Вследствие этого ток в емкостях  $K_0$  неизменен, а кривая  $U_{нач}$  распределяется по обмотке в виде прямой зависимости выражения:

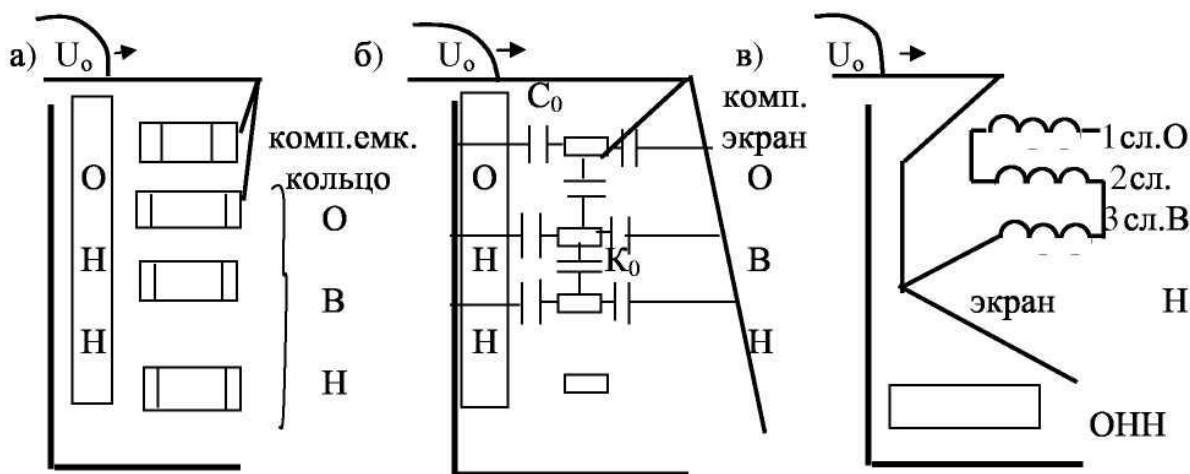
$$U_{нач} = U_0(l - x/l). \quad (13)$$

Т.к. в трансформаторе с заземленной нейтралью совпадают значения  $U_{нач}$  и  $U_{уст}$  в обмотке колебания  $U_{св}$  не возникают.

Наклон экрана в обмотке ВН рассчитывается:

$$C_k = C_0(l - x) / x \quad (14)$$

и  $U_{max}$  равномерно распределяется по обмотке ОВН. Емкостная компенсация в обмотках трансформаторов на 110-220 кВ снижает  $E_c$  почти вдвое;



а) компенсационного экрана б) слоевых обмоток в) в трансформаторах ВН

Рисунок 6 – Устройство емкостного кольца

в) петлевые обмотки, применение которых приводит к резкому увеличению продольных емкостей  $K_0$ . Это соединение обмоток удаляет первые по порядковому номеру витки и приближает к вводу обмотки дальние витки, равномерно распределяется напряжение  $U_{нач}$ , отсутствует  $U_{св}$ . В настоящее время получили распространение в трансформаторах ВН;

г) слоевые обмотки. Особенностью их является большая емкость  $K_0$  между слоями обмоток и малая емкость слоев изоляции на землю  $C_0$ . Такие обмотки укладываются в отечественных трансформаторах до 35 кВ включительно с изолированной нейтралью. Эти обмотки имеют экран и приведены на рисунке 6 в.

Распределение  $U_{max}$  в таких обмотках незначительно отличается от первоначального  $U_{нач}$ . Использование таких обмоток в силовых трансформаторах с заземленной нейтралью существенно экономит изоляцию, т. к. главная изоляция слоя включает в себя изоляцию всех слоев обмотки.

### Заклучение.

Атмосферные перенапряжения представляют опасность для надежной работы силовых трансформаторов. Установка систем ПСГМ в Казахстане позволяет регистрировать основные параметры молнии в режиме реального времени грозовых разрядов. Распределение напряжения в обмотках трансформаторов и распространение волн основываются на теории волновых процессов. Применение специальных устройств позволит снизить значения максимальных перенапряжений.



## ЛИТЕРАТУРА

[1] Гизатов А.А. Повышение эксплуатационной надежности силовых трансформаторов// Современные научные исследования и инновации. – Москва: 2021, №6 (122), с.67-72.

[2] А.А.Дульзон, В.П.Горбатенко. Результаты исследования грозовой активности над территорией Томской области//Известия Томского политехнического университета.- Томск: 2006, Т.309, №2, с.126-130.

[3] СП РК 2.04-103-2013. Устройство молниезащиты зданий и сооружений.

[4] Кадомская К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. – Новосибирск: Энергия, 2006. – 350 с.

## REFERENCES\*

[1] Gizatov A.A. Povyshenie jekspluatacionnoj nadezhnosti silovyh transformatorov// Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii. – Moskva: 2021, №6 (122), s.67-72.

[2] A.A.Dul'zon, V.P.Gorbatenko. Rezul'taty issledovaniya grozovoj aktivnosti nad territoriej Tomskoj oblasti//Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. - Tomsk: 2006, T.309, №2, s.126-130.

[3] SP RK 2.04-103-2013. Ustrojstvo molniezashhity zdaniy i sooruzhenij.

[4] Kadomskaja K.P. Perenaprjazhenija v jelektricheskikh setjah razlichnogo naznachenija i zashhita ot nih. – Novosibirsk: Jenergija, 2006. – 350 s.

**Жанар Оржанова**, т.ғ.к., профессор, Еуразия технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, zhanar.orzhanova@mail.ru.

**Алия Боканова**, т.ғ.д., профессор, Еуразия технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, bokanova\_a@mail.ru.

**Жанібек Исабеков**, PhD, доцент м.а., Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан, zhanibek.issabekov@ayu.edu.kz.

## ҚУАТ ТРАНСФОРМАТОРЛАРЫНДАҒЫ АТМОСФЕРАЛЫҚ АСҚЫН КЕРНЕУЛЕР ЖӘНЕ АСҚЫН КЕРНЕУДЕН ҚОРҒАУ

**Аңдатпа.** Мақала атмосфералық асқын кернеулерге ұшыраған кезде пайдалану сенімділігін бағалауды қамтитын қуат трансформаторларын зерттеу мәселелеріне арналған. Қазақстан аумағында найзағай белсенділігінің таралуы келтірілген, трансформатор орамдарында болып жатқан толқындық процестер және трансформаторларды ішкі қорғауға арналған іс-шаралар қарастырылған.

**Түйінді сөздер.** Атмосфералық асқын кернеулер, қуат трансформаторлары, толқындық процестер, кернеудің таралуы.

**Zhanar Orzhanova**, candidate of technical sciences, professor, Eurasian Technological University, Almaty, Kazakhstan, zhanar.orzhanova@mail.ru.

**Aliya Bokanova**, doctor of technical sciences, professor, Eurasian Technological University, Almaty, Kazakhstan, bokanova\_a@mail.ru.

**Zhanibek Issabekov**, PhD, acting associate professor, International Kazakh-Turkish university named after Khoja Ahmed Yasawi, Turkestan, Kazakhstan, zhanibek.issabekov@ayu.edu.kz

## ATMOSPHERIC OVERVOLTAGES IN POWER TRANSFORMERS AND SURGE PROTECTION

**Abstract.** The article is devoted to the research of power transformers, which include an assessment of operational reliability when exposed to atmospheric overvoltages. The distribution of thunderstorm activity on the territory of Kazakhstan is given, wave processes occurring in transformer windings and measures for internal protection of transformers are considered.

**Keywords.** Atmospheric overvoltages, power transformers, wave processes, voltage distribution.

\*\*\*\*\*