



ОГАПОУ «Белгородский индустриальный колледж»

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Выполнил: студент группы 21ТЭО

Федоров Тихон

Белгород, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

- Причины появления перенапряжений
- Схема замещения при перенапряжениях
- Распределение напряжения по обмотке в начале переходного процесса
- Распределение напряжения по обмотке в течение переходного процесса
- Защита от перенапряжений

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

При нормальных условиях работы трансформатора между отдельными частями его обмоток (витками и катушками), а также между обмотками и заземленным магнитопроводом действуют синусоидальные напряжения номинальной частоты и амплитуды, которые не опасны для правильно спроектированного трансформатора. Если конец обмотки заземлен, то напряжения, действующие между ее витками и заземленным магнитопроводом, изменяются равномерно, уменьшаясь по мере приближения к концу обмотки. При изолированном конце все точки обмотки находятся под одним и тем же напряжением относительно заземленного магнитопровода.

Однако в процессе эксплуатации трансформатор подвергается также воздействию перенапряжений, превышающих номинальное напряжение по амплитуде и имеющих другую частоту и форму кривой. Перенапряжения в трансформаторах вызывают различные причины: коммутационные (включение и выключение трансформатора или соединенных с ним электрических линий), короткие замыкания и грозовые разряды. Наибольшие перенапряжения (до десятикратных значений номинального напряжения) возникают при прямых ударах молнии в провода и опоры электрических линий и при грозовых разрядах вблизи линий, во время которых в проводах индуцируются электромагнитные волны высокого напряжения. Эти перенапряжения называют атмосферными, они наиболее опасны для продольной изоляций (между катушками, слоями и витками обмотки). Перенапряжения, возникающие вследствие коммутационных причин, воздействуют в основном на главную изоляцию обмоток.

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В большинстве случаев грозовые разряды создают в линии перенапряжения в виде кратковременных импульсов (или периодических волн), причем амплитуда и форма импульса перенапряжения, проникающего в обмотки трансформатора, в значительной степени зависит от дальности атмосферного разряда, принятой защиты трансформаторной подстанции от перенапряжений, подходов к ней и т. п. Примерная форма импульса перенапряжений показана на рис. 2.65, *а*. Увеличение напряжения от нуля до максимума (фронт волны) происходит за очень короткий отрезок времени, измеряемый часто десятками долями микросекунды. Волна с крутым фронтом может рассматриваться как $\frac{1}{4}$ периода переменного напряжения очень высокой частоты (10—50 кГц).

Рис. 2.65. Форма волны перенапряжения и упрощенные схемы замещения первичной обмотки трансформатора при воздействии этой волны: 1— фронт волны; 2 - хвост волны.

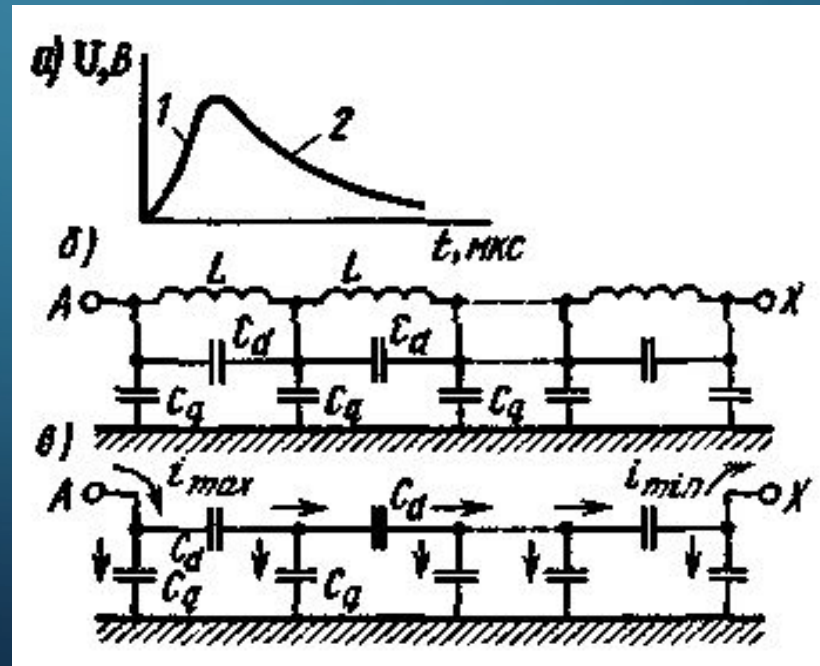
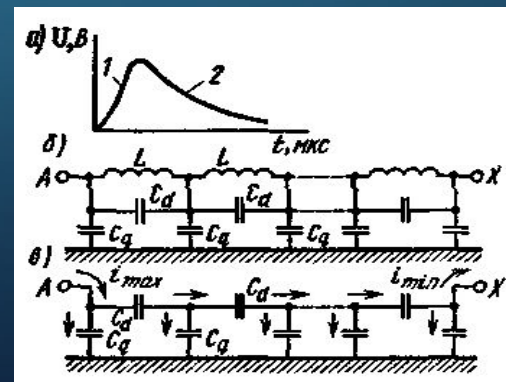


СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

В полную схему замещения трансформатора кроме активных и индуктивных сопротивлений необходимо вводить емкостные сопротивления, обусловленные продольными емкостями C_d между отдельными элементами обмоток (витками и катушками) и поперечными емкостями C_q , между этими элементами и заземленными частями (магнитопровод, бак). При рабочей частоте 50 Гц созданные емкостями сопротивления весьма велики и практически не оказывают влияния на работу трансформатора. Однако при больших частотах, характерных для волн перенапряжения, влияние этих емкостей возрастает, так как по мере увеличения частоты индуктивное сопротивление X_L увеличивается, а емкостное X_C уменьшается. Следовательно, все большая часть тока начинает проходить через емкости C_d и C_q .

На рис. 2.65,6 изображена упрощенная схема замещения входной обмотки трансформатора при перенапряжениях, в которой не учитывается активное сопротивление, а индуктивности L включают в себя как собственную, так и взаимные индуктивности каждого элемента обмоток. При подходе волны напряжения к зажимам трансформатора напряжение на обмотке вследствие большой крутизны фронта волны быстро возрастает. Скорость этого процесса настолько велика, что ток сначала не проходит по виткам обмотки из-за большой их индуктивности, а проходит только по ее емкостной цепи (см. рис. 2.65, в). В этот момент обмотка действует как некоторая единая емкость $C_{вх} = \sqrt{C_{дпрз} C_{кпрз}}$, называемая входной. При этом значения продольной и поперечной составляющих входной емкости $C_{дпрз} = 1/\sum C_d$ и $C_{кпрз} = \sum C_q$.

Рис. 2.65. Форма волны перенапряжения и упрощенные схемы замещения первичной обмотки трансформатора при воздействии этой волны: 1 — фронт волны; 2 — хвост волны.



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБМОТКЕ В НАЧАЛЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

При воздействии на трансформатор набегающей волны перенапряжения с крутым фронтом в схеме замещения входной обмотки возникает переходный процесс изменения тока и напряжения. В начальный момент в течение долей микросекунды возникает процесс заряда входной емкости. При этом при переходе волны напряжения из электрической линии (т. е. из цепи с меньшим волновым сопротивлением) в трансформатор (т. е. в цепь с большим волновым сопротивлением) напряжение на его входной обмотке сначала уменьшается до нуля, а затем возрастает и достигает двукратного значения амплитуды волны. При начальном заряде входной емкости токи и электрические заряды распределяются по емкостной цепи (рис. 2.65, в) от начала обмотки A к ее концу X неравномерно, так как по мере приближения к концу обмотки все большая часть тока ответвляется через поперечные емкости C_q в землю. Поэтому начальное распределение напряжения вдоль обмотки также неравномерно. Степень неравномерности зависит от коэффициента $\alpha = \sqrt{C_{\text{qрез}}/C_{\text{дрез}}}$. Решение системы дифференциальных уравнений, характеризующих распределение зарядов и напряжений вдоль емкостной цепи, имеет следующий вид:

$$u_x = A_1 e^{\alpha x} + A_2 e^{-\alpha x}, \quad (2.102)$$

где x — относительное расстояние рассматриваемой точки обмотки от ее конца (принимая длину обмотки $l = 1$); A_1 и A_2 — постоянные интегрирования, которые находятся из начальных условий.

При заземлении конца обмотки X уравнение (2.102) принимает вид

$$u_x = U_A (e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}) / (2 \operatorname{sh} \alpha) = U_A \operatorname{sh} \alpha x / (\operatorname{sh} \alpha), \quad (2.103)$$

а при незаземленном конце

$$u_x = U_A (e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}) / (2 \operatorname{ch} \alpha) = U_A \operatorname{ch} \alpha x / (\operatorname{ch} \alpha), \quad (2.104)$$

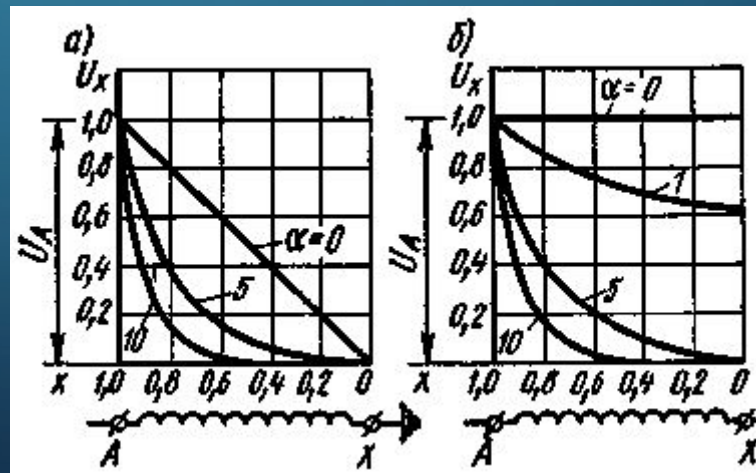
где U_A — амплитуда волны перенапряжения.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБМОТКЕ В НАЧАЛЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Полученные из уравнений (2.103) и (2.104) начальные распределения напряжений вдоль обмотки для различных значений α при заземленной и изолированной нейтрали изображены на рис. 2.66, а и б.

Обычно в трансформаторах $C_{\text{qрез}} > C_{\text{дрез}}$ и $\alpha = 5 \div 15$, поэтому начальное распределение напряжения вдоль обмотки крайне неравномерно и почти одинаково для обмоток с заземленной и изолированной нейтралью. Кривые распределения напряжения показывают, что *при перенапряжениях наибольшей опасности подвергается изоляция начальных витков и катушек, так как в начальные моменты на них падает максимальная часть напряжения.*

Рис. 2.66. Начальные распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора при перенапряжениях для различных значений α .

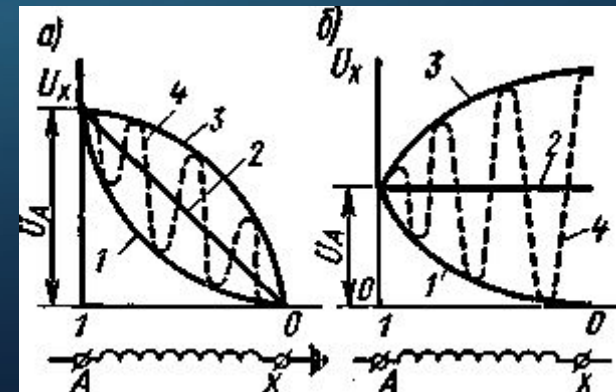


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБМОТКЕ В ТЕЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

По окончании переходного процесса в обмотках с заземленным концом напряжение распределено вдоль обмотки равномерно (рис. 2.67, а), а в обмотках с изолированным концом ко всем частям обмотки приложено одинаковое напряжение (рис. 2.67, б). Процесс проникновения волны перенапряжения в обмотку можно рассматривать как переход от начального распределения напряжения (кривые 1) к конечному (прямые 2). Индуктивности и емкости, имеющиеся в схеме замещения, образуют колебательные контуры, вследствие чего переходный процесс сопровождается возникновением высокочастотных электромагнитных колебаний. Амплитуда возможных колебаний напряжения в каждой точке обмотки равна разности ординат кривых 1 и прямых 2. Они совершаются относительно прямых 2 — конечного распределения напряжений, поэтому максимальные значения их ограничены кривыми 3. Штриховые кривые 4 на рис. 2.67 показывают характер распределения напряжения вдоль обмотки в некоторый момент времени после начала переходного процесса. С течением времени возникающие колебания из-за наличия активного сопротивления обмотки затухают.

Из рассмотрения кривых, приведенных на рис. 2.67, следует, что во время колебаний большие перепады напряжения возникают в средней и конечной частях обмотки. Кроме того, в отдельных частях обмотки напряжение относительно земли может стать больше амплитуды падающей на обмотку волны перенапряжения U_A . В частности, *при незаземленной нейтрали наибольшее напряжение падает на изоляцию конечных витков и катушек*. Это является существенным недостатком трансформаторов с изолированной нейтралью.

Рис. 2.67. Распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора при высокочастотных колебаниях: 1 — начальное распределение; 2 — конечное распределение; 3 — граничные значения максимальных напряжений; 4 — изменение напряжения вдоль обмотки при колебательном процессе



ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Для предотвращения воздействия на трансформаторы волн перенапряжений с амплитудой, превышающей допустимую для данного класса изоляции, трансформаторные подстанции защищают заземленными тросами и разрядниками. Они обеспечивают снижение амплитуды падающей на трансформаторы волны перенапряжения.

В трансформаторах напряжением 35 кВ для защиты от атмосферных перенапряжений в начале и конце обмотки ВН усиливают изоляцию первой и второй катушек, а также увеличивают вентиляционные каналы между ними. Нейтрали обмоток с напряжением 35 кВ и выше заземляют непосредственно либо через сопротивления, которые при высокочастотных колебаниях не оказывают существенного влияния на характер переходного процесса.

Для выравнивания начального распределения напряжения и сближения его с конечным распределением, а также для снижения опасных резонансных электромагнитных колебаний под воздействием волн перенапряжений в трансформаторах напряжением 110 кВ и выше применяют *емкостную защиту обмоток*. Сущность такой защиты заключается в том, что в конструкцию обмотки включают добавочные емкости $C_{\text{с}1}$ и $C_{\text{с}2}$ (рис. 2.68, а), выполненные в виде электростатических экранов, которые шунтируют продольные емкости C_d . В этом случае при заземлении конца X обмотки ВН кривая начального распределения напряжения 1 (см. рис. 2.67) приближается к прямой 2 конечного распределения.

ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Емкостная защита состоит из следующих элементов (рис. 2.68,6):

а) емкостного кольца 1, установленного у входной катушки. Оно выравнивает электрическое поле у начала обмотки и представлено на принципиальной схеме (рис. 2.68, а) в виде емкости $C_{э1}$. Емкостное кольцо изготавливают из тонкой медной ленты шириной 20—30 мм, завернутой в кабельную бумагу и наматываемой в два слоя (бифилярно) на шайбу из электрокартона с закругленными краями;

б) экранирующих витков 3, выполненных в виде разомкнутых металлических колец, охватывающих несколько первых катушек обмотки и прикрепленных к ним. Они повышают электрические потенциалы у начальной и последующих катушек обмотки и представлены на принципиальной схеме (рис. 2.68, а) в виде емкостей $C_{э2}$. Экранирующие витки выполняют из того же провода, что и витки катушек и имеют усиленную изоляцию. Для уменьшения емкостей $C_{э2}$ экранирующие витки катушек, более удаленных от начала, располагают на большем расстоянии от катушек обмотки, чем начальные витки. Все начала экранирующих витков и емкостное кольцо присоединяют к началу А обмотки, т. е. они имеют потенциал электрической линии. Трансформаторы с емкостной защитой называют грузоупорными или перезонирующими, так как у них практически устранена опасность возникновения значительных резонансных колебаний в обмотках при воздействии периодических затухающих волн перенапряжения.

В трансформаторах напряжением 110 кВ и выше наряду с емкостной защитой начальные 2 и концевые катушки высоковольтных обмоток выполняют с усиленной изоляцией.

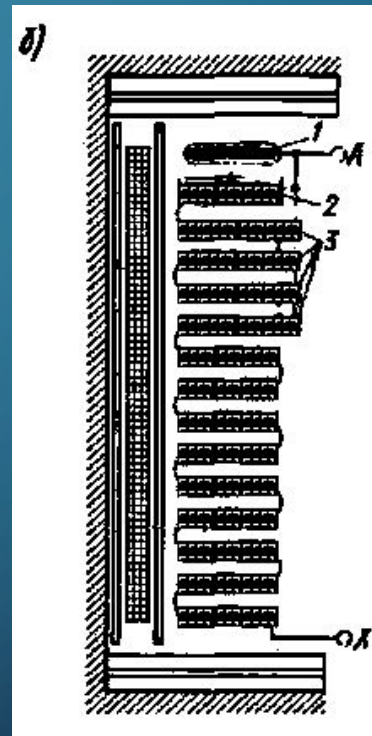
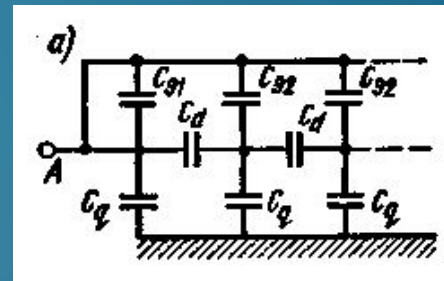


Рис. 2.68. Принципиальная схема емкостной защиты и ее выполнение в трансформаторах напряжением 110 кВ