

# ВЛИЯНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ ГЕНЕРАТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МОЩНЫХ БЛОКОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИЛОВЫХ БЛОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Кандаков С.А., аспирант  
Лаптев О.И., аспирант  
НГТУ, кафедра ТиЭВН

В работах различных авторов неоднократно рассматривались проблемы, возникающие при эксплуатации сети с изолированной нейтралью. Этих проблем настолько много, что всех и не перечислить. Тем не менее, круг рассматриваемых ранее вопросов всегда замыкался на исследовании режимов работы высоковольтного оборудования в самой сети с изолированной нейтралью. Однако исследования, проведенные в течение последнего времени на кафедре ТиЭВН НГТУ, показывают, что в некоторых случаях нештатные ситуации в сети с изолированной нейтралью могут служить причиной аварий, происходящих в высоковольтной сети с глухозаземленной нейтралью.

Суть исследований сводится к тому, что при возникновении однофазного дугового замыкания на землю со стороны низковольтной обмотки трансформатора, перенапряжения могут, вследствие протекания резонансных электромагнитных процессов в обмотках силового трансформатора, привести к пробое высоковольтной обмотки трансформатора.

На рис.1 представлена типичная схема присоединения к электроэнергетической системе мощных блоков тепловых и атомных станций.

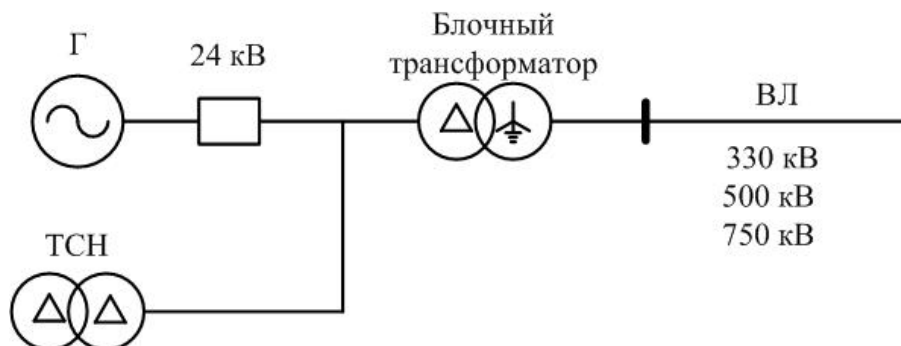


Рис.1. Принципиальная схема соединений типичных блоков большой мощности тепловых и атомных станций

При включенном генераторном выключателе электромагнитные параметры генераторного оборудования обуславливают собственную частоту переходных процессов в случае ОДЗ на уровне нескольких килогерц. В основном эта частота обусловлена емкостями и сверхпереходными индуктивностями генератора и блочного трансформатора. Например, для генератора ТВВ-1000 и блочного трансформатора ОДЦ-417/500 суммарная емкость составляет 556 нФ (в основном обусловлена емкостью генератора – 530 нФ), сверхпереходная индуктивность генератора – 0.53 мГн и, следовательно, собственная частота колебаний будет

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3L_{\Sigma} \cdot C_{\Sigma\phi}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3 \cdot 0.00053 \cdot 556 \cdot 10^{-9}}} \approx 5.4 \text{ кГц.}$$

Эта частота является достаточно низкой и не может приводить к возникновению резонансных электромагнитных процессов в обмотках трансформатора.

Однако совсем иная картина наблюдается при отключенном генераторном выключателе. В этом случае суммарная емкость с низковольтной стороны блочного трансформатора резко уменьшается и составляет величину порядка  $35 \div 40$  нФ (обусловлена емкостью трансформатора собственных нужд, генераторного токопровода и самого блочного трансформатора). Уменьшается также и суммарная индуктивность схемы – она находится в диапазоне  $0.3 \div 0.4$  мГн. Следовательно, собственная частота колебаний составит

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3L_{\Sigma} \cdot C_{\Sigma\phi}}} = \frac{10^{-3}}{2\pi\sqrt{3 \cdot (0.3 \div 0.4) \cdot 10^{-3} \cdot (35 \div 40) \cdot 10^{-9}}} \approx 23.0 \div 28.4 \text{ кГц.}$$

Наблюдаемая при отключенном генераторе частота собственных колебаний схемы при ОДЗ в сети генераторного напряжения хорошо согласуется со спектром резонансных частот силового трансформатора.

С целью более подробного анализа возможных последствий этой ситуации на кафедре ТиЭВН проводилась научно-исследовательская работа, в ходе которой была сделана попытка как можно более подробно смоделировать силовой блочный трансформатор в соответствующем спектре частот.

Схема замещения трансформатора при учете конструктивных особенностей его обмоток включает в себя совокупность различных элементов (ёмкостей, индуктивностей и активных сопротивлений), соединённых различным образом между собой. Сложность расчёта этих параметров схемы замещения состоит в том, что все они (за исключением, ёмкостей) являются не только частотно-зависимыми, но и нелинейными. Все расчеты параметров схемы замещения проводились численно с использованием современного метода расчета электромагнитных полей – метода конечных элементов (МКЭ). При определении индуктивных параметров схемы замещения принималось допущение, заключающее в том, что вследствие вытеснения магнитного потока при «достаточно» высоких частотах на поверхность магнитопровода магнитное поле не проникает в магнитопровод. Погрешность, вносимая этим допущением уменьшается с увеличением частоты и в исследуемом диапазоне  $25 \div 35$  кГц не является существенной. Трёхмерная геометрия трансформатора реализовывалась в пакете Solid Works на основании сборочных чертежей трансформатора ОДЦ-417000/500 (рис.2).

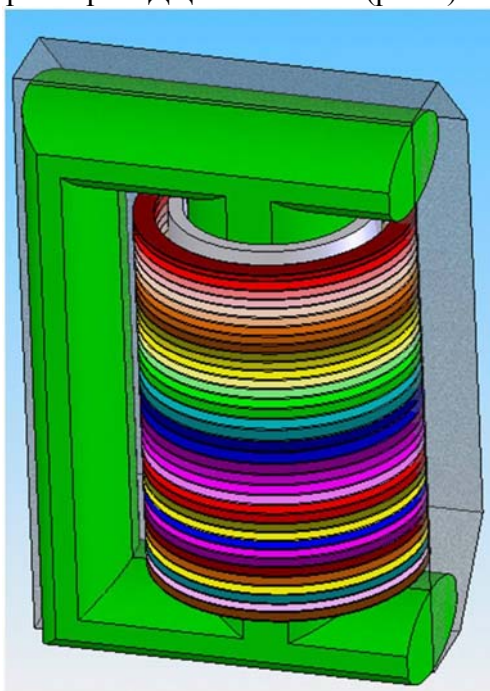


Рис. 2. Результат моделирования трансформатора ОДЦ 417000/500 в пакете Solid Works

### **Расчёт ёмкостей**

При расчёте ёмкостей обмотки трансформатора разбивались на элементы, под каждым из которых (элементом) подразумевалась одна или группа реальных катушек, так как расчёт схемы замещения при учёте всех катушек (148 шт. на одну обмотку ВН для трансформатора ОДЦ) не представляется в настоящее время возможным. Общее количество элементов разбиения составило 47. При группировке элементов в основу был положен принцип, заключающийся в том, что часть обмотки ВН, испытывающая наибольшие градиенты напряжений, моделировалась более подробно (практически покатушечно) – это начало обмотки (у высоковольтного ввода) и конец обмотки (вблизи заземленного конца). В результате расчёта по разработанному алгоритму определялись собственные ёмкости элементов на землю (магнитопровод, бак и экранирующие кольца принимались заземлёнными) и взаимные ёмкости между элементами. Сравнение ёмкостей обмоток ВН и НН, а также их взаимной ёмкости с измеренными значениями, предоставленными ОАО «Запорожтрансформатор», показывают хорошую сходимость результатов.

### **Расчёт индуктивностей**

Расчёт индуктивностей осуществлялся также с помощью векторного метода конечных элементов. Геометрия расчётной модели, а также разбиение обмоток ВН и НН практически та же, что и при определении ёмкостей.

Индуктивности схемы замещения трансформатора с учётом принятого допущения о полном вытеснении магнитного поля из металлической среды могут быть определены на постоянном токе (с помощью расчёта магнитоэстатического поля внутри объёма трансформатора). Единственной особенностью в этом случае является корректное задание граничных условий на поверхностях металлов. Корректным граничным условием при принятом допущении является условие параллельности вектора напряжённости магнитного поля (индукции магнитного поля) поверхности проводника

$$\vec{n} \times \vec{H} = 0 \text{ или } \vec{H} = H_{\tau},$$

где  $H_{\tau}$  - тангенциальная составляющая напряжённости магнитного поля.

Взаимная индуктивность между двумя катушками (или группами катушек) определялась исходя из энергетических представлений [1] с использованием понятия приращения энергии магнитного поля. В соответствие с этим методом, взаимная индуктивность между двумя контурами с током определяется как:

$$M_{ij} = \frac{d^2 W}{dI_i dI_j} = \frac{2W_{ij}}{\Delta I_i \Delta I_j}, \quad (1)$$

где  $\Delta I_i$  - приращение тока в  $i$ -ом контуре (катушке),  $\Delta I_j$  - приращение тока в  $j$ -ом контуре (катушке),  $W_{ij}$  - приращение энергии магнитного поля, вызванное приращением токов в катушках, определяемое как

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \int_V \{\Delta H\} \{\Delta B\} dV. \quad (2)$$

Интегрирование в (2) должно быть произведено по всему объёму трансформатора (за исключением магнитопровода и меди катушек).

Собственная индуктивность  $i$ -ой катушки определяется при  $i=j$ .

Изложенная методика была реализована в пакете ANSYS (так же, как и методика расчёта ёмкостей).

Расчёт матрицы индуктивностей  $L$  проводился при разбиении модели трансформатора на 406000 конечных тетраэдральных элементов (рис.3) и занял примерно 80 часов компьютерного времени. На рис.4 показано разбиение обмоток по катушкам.

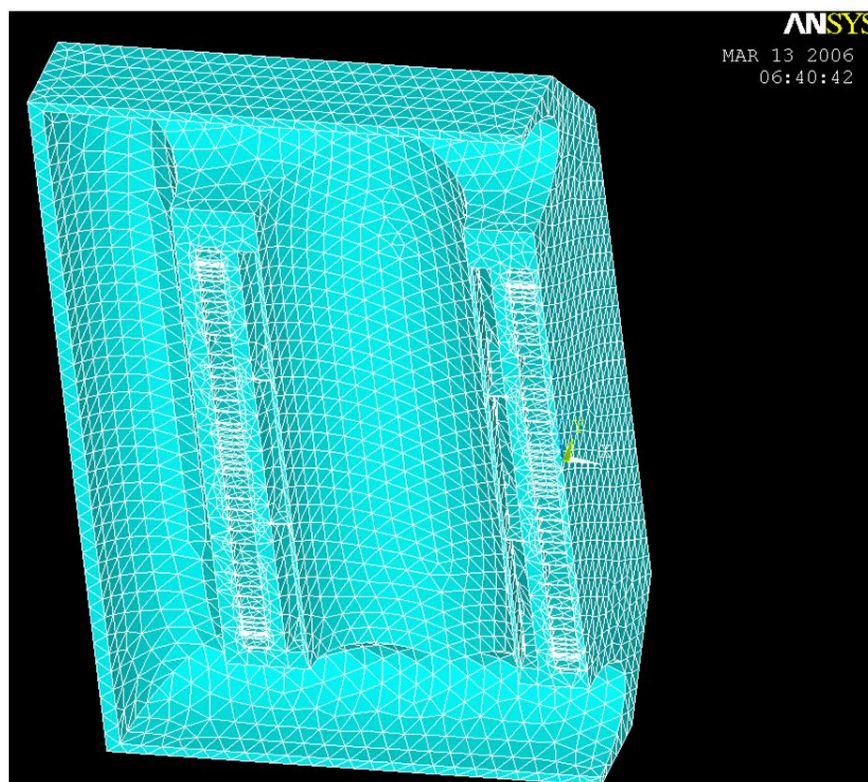


Рис.3 Разбиение объема трансформатора на конечные тетраэдральные элементы

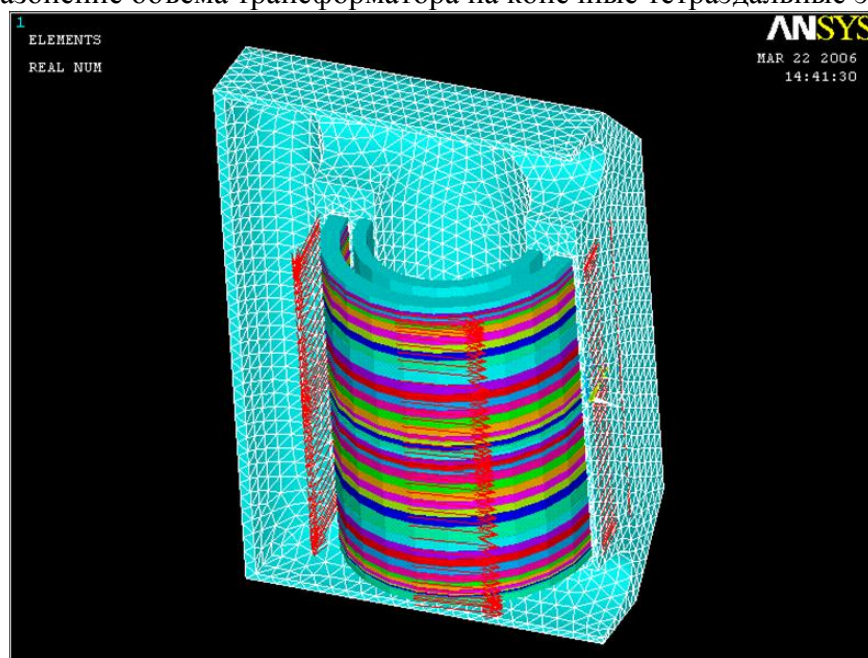


Рис.5. Катушки, смоделированные в ANSYS

### ***Расчёт активных сопротивлений***

Задача расчёта активных сопротивлений схемы замещения трансформатора стоит обособленно в ряду задач по определению параметров многоэлементной схемы замещения. Строгий расчёт активных сопротивлений с учётом наличия шихтованного ферромагнитного сердечника в настоящее время не представляется возможным. Моделирование стального сердечника в виде сплошного цилиндра (без учёта факта шихтовки) [2] не корректно. Поэтому при выполнении настоящей работы учитывались лишь активные потери в меди обмоток. Такое допущение приводит к **не заниженным** кратностям перенапряжений, так как активные сопротивления влияют в первую очередь на затухание электромагнитных процессов в обмотках трансформатора.

Расчёт активных сопротивлений проводился в пакете FEMLAB при условии осесимметричности задачи (цилиндрическая система координат).

### **Частотный спектр обмотки высшего напряжения силового трансформатора**

Методика определения частотного спектра обмотки высшего напряжения заключалась в следующем: к обмотке НН прикладывался идеальный источник ЭДС с заданной частотой, которая изменялась в необходимых пределах (1...100 кГц). Высоковольтный вывод обмотки ВН заземляется через активное сопротивление величиной 330 Ом (волновое сопротивление ВЛ 500 кВ). В результате расчёта определялись напряжения в узлах многоэлементной модели обмотки ВН относительно земли, а также продольные напряжения на элементах разбиения. Схема воздействия на многоэлементную модель трансформатора приведена на рис.6. На рис.7. приведена зависимость максимальных продольных напряжений на катушках в зависимости от частоты приложенного сигнала.

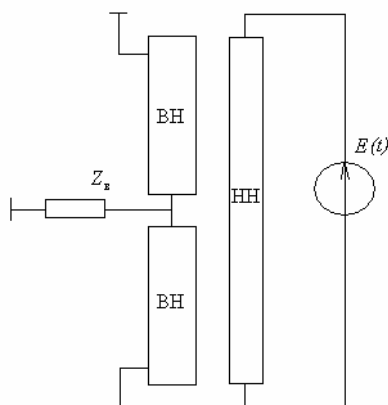


Рис.6. Схема воздействия на многоэлементную модель трансформатора ОДЗ при определении спектра обмотки ВН

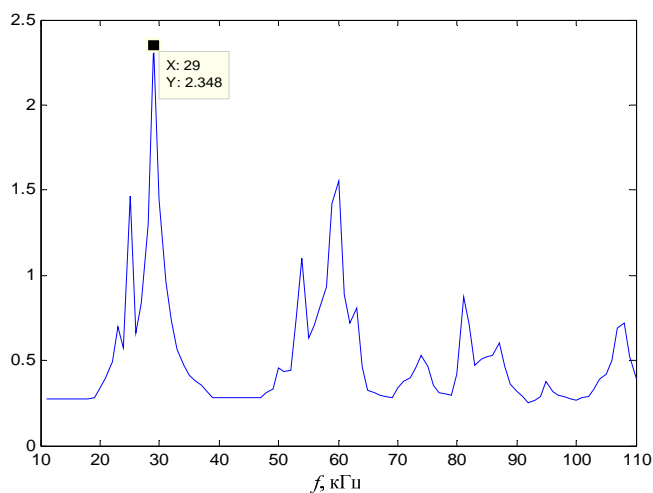


Рис.7. Зависимость максимальных продольных напряжений на катушках в зависимости от частоты приложенного сигнала

Из рис.7 видно, что характерными резонансными частотами являются частоты 29-30 кГц, и 60 кГц, первая из которых совпадает с характерным спектром частот собственных колебаний схемы при ОДЗ на стороне НН трансформатора при отключенном генераторе. При этой частоте возникают продольные перенапряжения на катушках обмотки ВН, и, как видно из рис.7, значительные градиенты возникают на крайних (регулирующих) катушках.

Расчет переходных процессов, происходящих при ОДЗ на стороне НН высоковольтного трансформатора (рис.8) показал, что возникающие в обмотке ВН

градиентные перенапряжения могут в ряде случаев превышать допустимое напряжение катушки и привести к её пробое (рис.9). Характерно, что наибольшие градиенты напряжений наблюдаются вблизи заземлённого конца высоковольтной обмотки (место установки регулировочных катушек РПН).

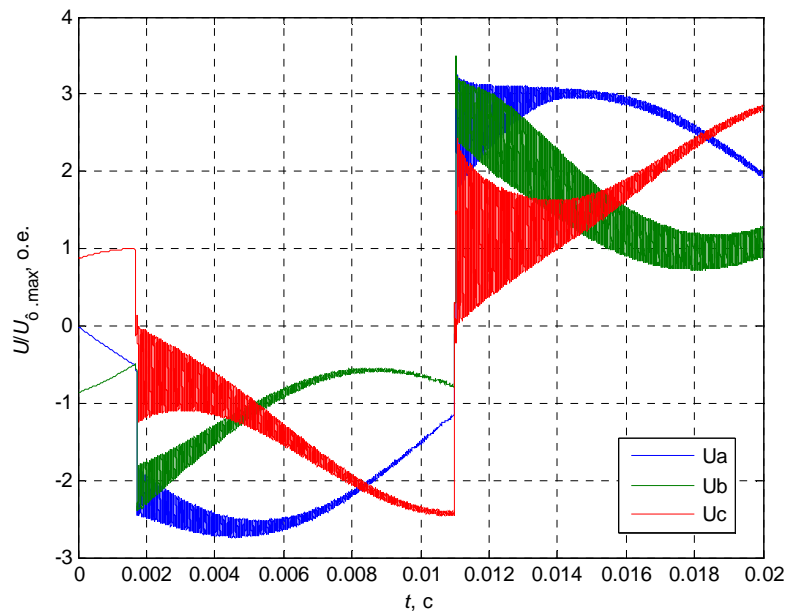


Рис.8. Осциллограмма напряжений на фазах при двух зажиганиях дуги

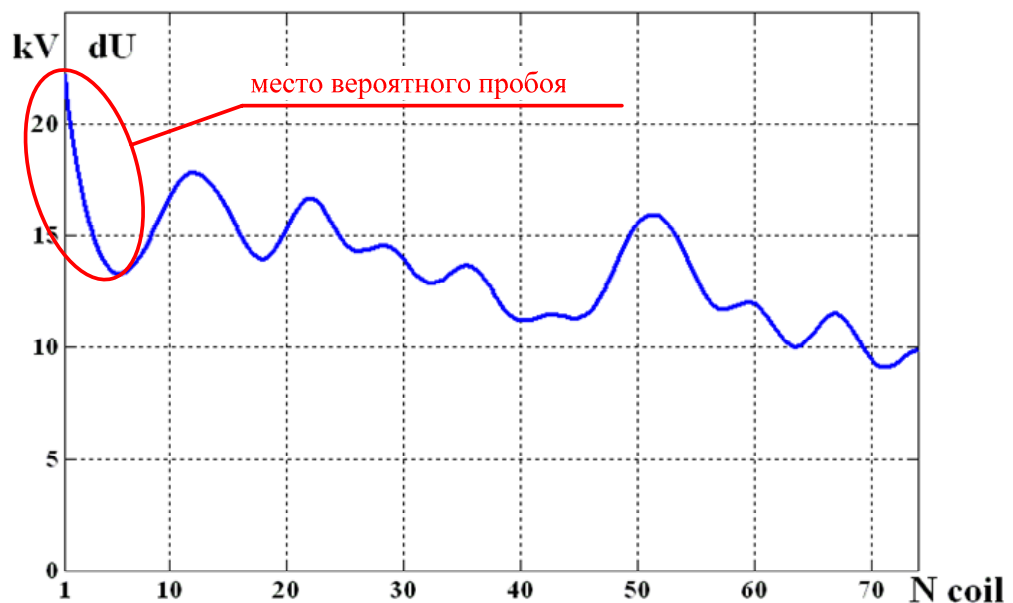


Рис.9. Распределение напряжения по обмотке ВН при ОДЗ на стороне НН

Таким образом, исследования показывают, что процессы, возникающие при ОДЗ в сети с изолированной нейтралью, могут негативно сказываться не только на оборудовании самой сети, но и на высоковольтном оборудовании, имеющем связь с ней. Результаты работы нельзя назвать полностью исчерпывающими, они требуют дальнейшего анализа в плане уточнения активных параметров схемы замещения силового трансформатора и разработки способов устранения возникающих внутри обмотки ВН резонансных перенапряжений.

## Литература



1. **Тамм И.Е.** Основы теории электричества: Учебное пособие для вузов. 11-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
2. **Конторович Л. Н.** Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук «Разработка математических моделей, методов расчёта импульсных процессов и параметров обмоток высоковольтных трансформаторов», - Новочеркасск.- 1979 г.
3. **ГОСТ 1516.1-76** Межгосударственный стандарт. Электрооборудование переменного тока напряжением от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. Издание официальное. ИПК Издательство стандартов. М.: 1999