

РАСЧЕТ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ОБМОТКИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ТРАНСФОРМАТОРА НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Елгина Г.А., Васильева О.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
6324050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: vasilova.o.v@mail.ru

Силовой трансформатор является одним из наиболее важных узлов электрической сети. Особенно актуальным в связи с этим является своевременное выявление развивающихся дефектов обмоток, которое позволяет вывести силовой трансформатор в ремонт прежде, чем случится авария, связанная с выходом его из строя.

В основе диагностики состояния обмоток трансформаторов низковольтными наносекундными импульсами лежит импульсный генератор, формирующий импульсы с фронтом единицы наносекунд и длительностью нескольких сотен наносекунд [1].

Спектр воздействующего наносекундного импульса обогащен высокочастотными компонентами, следовательно, при подаче такого импульса на трансформатор в его обмотках протекают высокочастотные токи, где плотность распределения тока по сечению проводника такова, что ток концентрируется вблизи поверхности проводника. Это явление, как известно, называется *скин-эффектом*.

Обмотке силового трансформатора можно сопоставить электротехническую схему замещения, но при составлении схемы замещения должны быть учтены три важных обстоятельства:

1. Так как воздействующий импульс имеет короткую длительность, схема замещения должна быть распределенной. Если составить схему замещения для одного витка (рис.1) (одно звено), то последовательное соединение таких схем (звеньев) образует электротехническую схему замещения с распределенными параметрами.

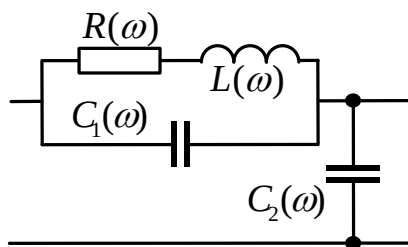


Рис. 1. Схема замещения одного витка обмотки

2. Так как воздействующий импульс имеет богатое высокочастотное наполнение, то, следовательно, нужно учитывать зависимость элементов схемы замещения от частоты, потому что при скин-эффекте сопротивление, индуктивность и емкость зависят от частоты.

3. При моделировании переходных процессов с использованием схемы замещения, необходимо

использовать принцип наложения по частотам. Для этого нужно определить частотный диапазон воздействующего импульса, разложив импульс в ряд Фурье. Далее отдельно рассчитывается переходный процесс для каждой гармоники разложенного импульса, при этом должна использоваться схема замещения с фиксированной частотой соответствующей гармонике.

Цель данной работы заключается в расчете частотной зависимости индуктивности и сопротивления витков круглого и прямоугольного сечений от частоты при предположении слабой зависимости емкостей от частоты. Для этого необходимо рассчитать распределения тока по поперечному сечению проводника.

Уравнения Максвелла позволяют получить уравнение для векторного потенциала A_ϕ , позволяющего определить плотность распределения тока по сечению проводника:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\epsilon)A_\phi + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A_\phi) = \frac{\sigma V}{2\pi r}, \quad (1)$$

где A_ϕ - векторный магнитный потенциал, V - напряжения проводника, $\sigma = 58.8 \cdot 10^6 \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{В} \cdot \text{м}}$ - электропроводность меди, r - радиус обмотки, ω - круговая частота, ϵ, μ - диэлектрическая, магнитная проницаемости соответственно.

Плотность тока и ток определяются выражениями:

$$J_\phi = \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A_\phi), \quad I = \pi \int_0^R J_\phi r^2 dr. \quad (2)$$

Магнитная энергия определяется выражением:

$$W = 2\pi \int_0^R A_\phi r dr \quad (3)$$

Из (3) при известном токе определяется индуктивность с помощью соотношения:

$$L = \frac{2W}{|I|^2} \quad (4)$$

При известном напряжении и токе определяем сопротивление проводника, используя формулу:

$$R = \text{Re} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (5)$$

Для определения частотного диапазона использовался импульс из натурального эксперимента (рис.2).

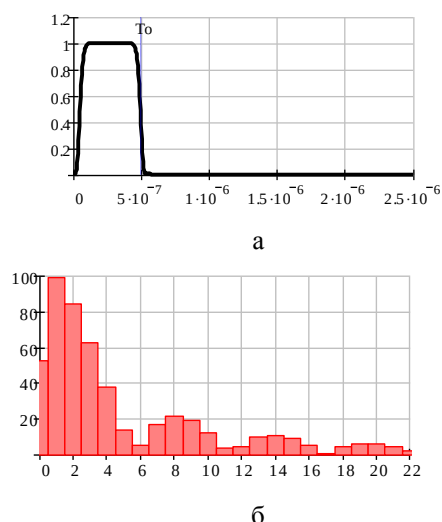


Рис.2. Низковольтный наносекундный импульс: а) фронт, б) разложение в ряд Фурье

Частота первой гармоники в разложении составляет $f_1 = 4 \cdot 10^5$ Гц или $\omega_1 = 2.51 \cdot 10^6$. С учетом 22-х первых гармоник исследование проводилось в частотном диапазоне $\omega \in [0; 5.53 \cdot 10^7]$ рад/с.

Внешняя обмотка намотана медным проводом диаметром $d = 2$ мм с шагом $h = 4$ мм, количество витков $n = 120$, внутренний диаметр $d_{\text{вн}} = 140$ мм, внешний диаметр $D_{\text{внеш}} = 160$ мм, длина медного кабеля $l = 370$ мм, основа – полихлорвиниловый цилиндр (рис.3, а). Внутренняя обмотка намотана медной шиной с размерами $a = 4$ мм, $b = 7$ мм, $n = 20$, $d_{\text{вн}} = 86$ мм, $D_{\text{внеш}} = 102$ мм, $l = 370$ мм, основа – винипластовый цилиндр (рис.3, б).

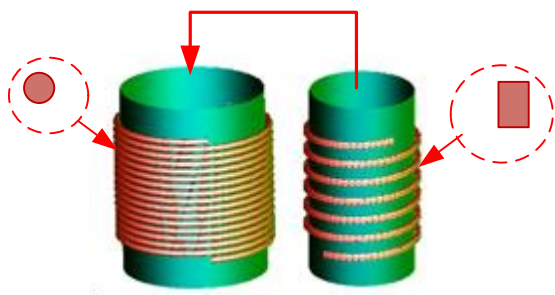


Рис.3. Обмотки трансформатора: а) внешняя, б) внутренняя

Для решения дифференциального уравнения (1) и соотношений (2) - (5) был использован метод конечных элементов с использованием математического пакета COMSOL Multiphysics. Полученные зависимости сопротивления R и индуктивности L от частоты ω для двух сечений обмоток силового трансформатора приведены на рисунках ниже (рис. 4, 5).

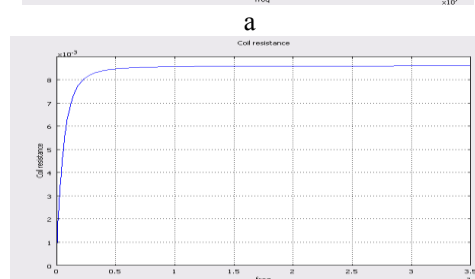
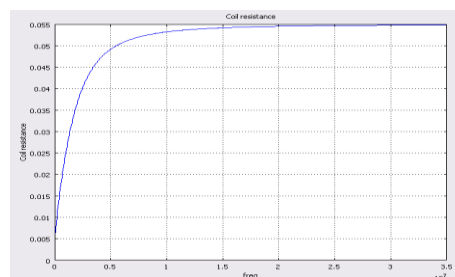


Рис.4. Зависимость сопротивления R от частоты ω : а) сечение в виде кольца, б) сечение в виде прямоугольника

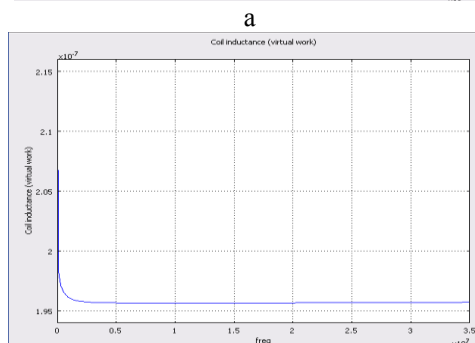
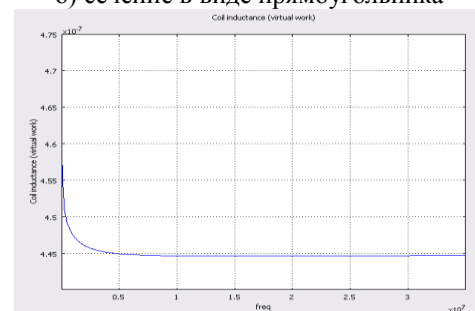


Рис.5. Зависимость индуктивности L от частоты ω : а) сечение в виде кольца, б) сечение в виде прямоугольника

Таким образом, представлен расчет частотной зависимости элементов схемы замещения обмоток трансформатора методом конечных элементов с использованием математического пакета COMSOL Multiphysics.

Список литературы

1. Лавринович В.А., Пичугина М.Т., Рамазанова А.Р. Применение наносекундных низковольтных импульсов для диагностики состояния обмоток силовых трансформаторов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 292-294.