

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ТОКОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ СХЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ

Цель работы – оценка эффективности схемных моделей [1,2], разработанных для численного моделирования поверхностного эффекта в токоведущих системах, сравнением результатов выполненных с их помощью расчетов с экспериментальными данными для пофазно-экранированных токопроводов (рис. 1-3), полученными американскими исследователями [3] в лаборатории, имеющей многолетний опыт измерений калориметрическим методом местных и средних потерь в элементах электрических приборов и аппаратов.

Авторами [3] измерялись мощности потерь в шинах и экранах реальных токопроводов с погрешностью, не превышающей 3%. Измерения проводились на токопроводах с секционированными (рис. 1,2) и непрерывными (рис. 1,3) экранами, для каждого из которых исследовалось пять вариантов токопроводов: варьировалось расстояние d между осями их фаз в пределах 28–48 дюймов.

Из всех исследованных в [3] вариантов токопроводов для иллюстрации совпадений результатов наших расчетов с экспериментальными данными [3] выбран вариант интересного с практической точки зрения токопровода с непрерывными экранами, расстояние между осями фаз которого $d=36$ дюймов. Исходные данные и результаты экспериментов, приведенные в [3] в английской системе мер и весов (дюймы, футы, фунты и т. п.), тщательно пересчитаны нами в единицы системы СИ. По эмпирическим формулам, приведенным в Руководстве [4], определены омические сопротивления алюминиевых шин и экранов при температуре 20°C , из которых рассчитаны их удельные проводимости. Последние в конечном итоге приведены к значениям, соответствующим температуре 25°C , к которой в [3] приведены все результаты измерений.

Итак, рассчитывался трехфазный пофазно-экранированный токопровод с горизонтальным расположением фаз (рис. 1) и непрерывными экранами (рис. 3) при протекании по нему фазных токов $\dot{J}_A = 4000 \text{ А}$, $\dot{J}_B = 4000e^{j135^\circ} \text{ А}$ и $\dot{J}_C = 4000e^{-j105^\circ} \text{ А}$ частотой $f=60 \text{ Гц}$.

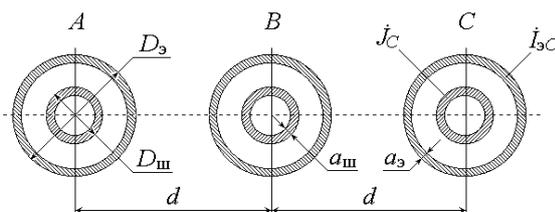


Рис. 1

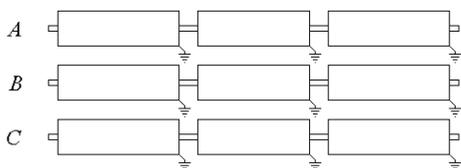


Рис. 2

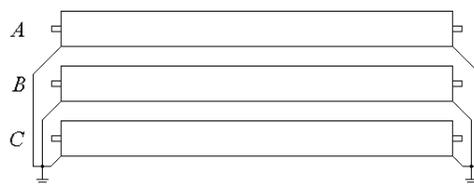


Рис. 3

Удельная проводимость материала шин равна $\gamma_{\text{ш}}=3,3027 \cdot 10^7 \text{ 1}/(\text{Ом} \cdot \text{м})$, а экранов — $\gamma_3=3,4166 \cdot 10^7 \text{ 1}/(\text{Ом} \cdot \text{м})$. Геометрические параметры токопровода: $d=0,9144 \text{ м}$; $D_3=0,5937 \text{ м}$; $a_3=0,0032 \text{ м}$; $D_{\text{ш}}=0,1651 \text{ м}$; $a_{\text{ш}}=0,0127 \text{ м}$.

Сечение каждой шины разделялось на 80 участков по окружности и 2 участка по толщине, таким образом, шина расщеплялась на $n_{\text{ш}}=80 \times 2=160$ ЭП. Сечение каждого экрана делилось на 112 участков (лишь по окружности), таким образом, экран разбивался

на $n_3=112$ ЭП. Общее число ЭП, которыми представлялись шины и экраны токопровода, составляло $n=3 \times n_{ш} + 3 \times n_3 = 480 + 336 = 816$.

Расчет выполнялся с использованием схемной модели для режима действия источников тока на входе токопровода [2]. Совокупность непрерывных экранов рассматривалась как сложный единый провод системы с нулевым током: $\dot{I}_3 = \dot{I}_{3A} + \dot{I}_{3B} + \dot{I}_{3C}$, т. е. токопровод представлялся системой $N=4$ проводов, токи которых заданы. Решалась система уравнений вида порядка $n+N=816+4=820$.

Результаты расчета потерь в шинах.

Мощности потерь в шинах отдельных фаз:

$$P_{шA}=86,731 \text{ Вт/м}; \quad P_{шB}=86,730 \text{ Вт/м}; \quad P_{шC}=86,733 \text{ Вт/м}.$$

Суммарная мощность потерь в шинах

$$P_{ш}=P_{шA}+P_{шB}+P_{шC}=260,194 \text{ Вт/м}.$$

Согласно [3] измерения мощности потерь в шинах дали $P_{ш[3]}=273,552 \text{ Вт/м}$.

Отклонение рассчитанной нами величины от измеренной составляет

$$\Delta P_{ш}^{(1)} = \frac{P_{ш} - P_{ш[3]}}{P_{ш[3]}} = \frac{260,194 - 273,552}{273,552} \cdot 100\% = -4,88\% .$$

По методике расчета потерь в пофазно-экранированных токопроводах, рекомендованной объединением американских инженеров-электриков в Руководстве [4], для мощности потерь в шинах получено $P_{ш[4]}=268,632 \text{ Вт/м}$. Отклонение рассчитанной нами величины от рассчитанной по [4] составляет

$$\Delta P_{ш}^{(2)} = \frac{P_{ш} - P_{ш[4]}}{P_{ш[4]}} = \frac{260,194 - 268,632}{268,632} \cdot 100\% = -3,14\% .$$

Результаты расчета потерь в экранах.

Мощности потерь в экранах отдельных фаз:

$$P_{эA}=81,088 \text{ Вт/м}; \quad P_{эB}=87,022 \text{ Вт/м}; \quad P_{эC}=62,797 \text{ Вт/м}.$$

Суммарная мощность потерь в экранах

$$P_э=P_{эA}+P_{эB}+P_{эC}=230,907 \text{ Вт/м}.$$

Согласно [3] измерения мощности потерь в экранах дали $P_{э[3]}=226,648 \text{ Вт/м}$.

Отклонение рассчитанной нами величины от измеренной составляет

$$\Delta P_э^{(1)} = \frac{P_э - P_{э[3]}}{P_{э[3]}} = \frac{230,907 - 226,648}{226,648} \cdot 100\% = 1,88\% .$$

По расчетной методике, приведенной в [4], суммарная мощность потерь в экранах токопровода получилась равной $P_{э[4]}=239,440 \text{ Вт/м}$. Отклонение рассчитанной нами величины от рассчитанной по [4] составляет

$$\Delta P_э^{(2)} = \frac{P_э - P_{э[4]}}{P_{э[4]}} = \frac{230,907 - 239,440}{239,440} \cdot 100\% = -3,56\% .$$

Представляют также интерес отклонения рассчитанных по [4] величин от измеренных в [3]:

$$\Delta P_{ш}^{(3)} = \frac{P_{ш[4]} - P_{ш[3]}}{P_{ш[3]}} = \frac{268,632 - 273,552}{273,552} \cdot 100\% = -1,80\% ;$$

$$\Delta P_э^{(3)} = \frac{P_{э[4]} - P_{э[3]}}{P_{э[3]}} = \frac{239,440 - 226,648}{226,648} \cdot 100\% = 5,64\% .$$

Приведенные результаты позволяет сделать вывод об эффективности численно-аналитического метода расчета электромагнитных параметров токопроводов на основе схемных моделей в виде веерных схем замещения токоведущих систем [1,2].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кияткин Р.П., Шакиров М.А. Электродинамика токоведущих систем электроэнергетических устройств // Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России: Труды Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Л.Р.Неймана, г. Санкт-Петербург, 27-28 июня 2002 г. – СПб.: СПбГПУ, 2002. – С. 256-258.
2. Кияткин Р.П. Построение схемных моделей для электромагнитных расчетов токоведущих систем, экранов и волноводов: Дисс. докт. техн. / СПбГПУ – СПб., 2005. – 350 с.
3. Elgar E.C., Rehder R.H, Swerdlow N. IEEE Trans. on PAS. – 1968. – V. 87. – No. 8 – P. 1724-1730.
4. IEEE Committee Report. Proposed guide for calculating losses in isolated-phase bus // IEEE Trans. on PAS. – 1968. – V. 87. – No. 8 – P. 1730-1737.