

УДК 621.311.004.12

В. И. СОБОРНИЦКИЙ – к. х. н., доцент, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», electrical_eng@udhtu.edu.ua

С. Г. ПАВЛЮС – к. т. н., доцент, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», electrical_eng@udhtu.edu.ua

И. И. ПАПАНОВА – к. х. н., доцент, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», electrical_eng@udhtu.edu.ua

В. М. ЗАМУРНИКОВ – к. т. н., доцент, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», electrical_eng@udhtu.edu.ua

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНДУКТИВНОСТЕЙ ПРОВОДОВ И ШИН

Индуктивность, а также индуктивное сопротивление проводов и шин, является важным параметром, имеющим большое значение при переносе электроэнергии и передаче сигналов по проводам линии. Индуктивное сопротивление оказывает особенно большое влияние на энергетические показатели мощных предприятий, в частности, на коэффициент мощности.

Большие значения индуктивности потребителей и токопроводов влекут за собой возрастание реактивной мощности и снижение коэффициента мощности. Полная мощность (S), которая передается потребителям,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (1)$$

Здесь P – активная мощность, Q – реактивная мощность.

Коэффициент мощности в общем виде –

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2)$$

Естественный $\cos \varphi$ равен обычно 0,6...0,8, что является недостаточным для предприятия или единичного мощного потребителя. Нормативный коэффициент мощности должен находиться в пределах 0,9...0,92. В масштабе Украины увеличение последнего лишь на 1 % дает возможность получить дополнительно до 60 млн. квт·ч электроэнергии в год [1].

Индуктивность зависит от многих параметров, в частности, от геометрии проводов и шин, а также от частоты [2–4]. Был проведен сравнительный анализ индуктивностей для токопроводов различной конфигурации. На рис. 1 показаны зависимости индуктивности шин квадратного сечения (кривые 1, 2) и шин круглого сечения (кривые 3, 4) от частоты и площади поперечного сечения.

При определении индуктивности сплошных токопроводов квадратного сечения использовались соотношения (3), (4):

– при низкой частоте

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{l}{b} + 0,5 \right), \quad (3)$$

– при весьма высокой частоте

$$L' = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{0,59b} - 1 \right), \quad (4)$$

где l – длина шины, b – сторона квадрата, являющегося поперечным сечением шины.

Для сплошных токопроводов круглого сечения индуктивность определяли по формулам (5), (6):

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right), \quad (5)$$

$$L' = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right), \quad (6)$$

здесь r – радиус сечения шины.

Для токопроводов полого сечения прямоугольной формы

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{b+c} + \frac{1}{2} \right), \quad (7)$$

где b и c – стороны поперечного сечения.

Зависимость индуктивности прямоугольных проводников от соотношения b/c показана на рис. 2. Значение $\ln(b/c) = 0$ соответствует квадратному сечению ($b = c$).

Слаботочные сигналы высокой и сверхвысокой частоты передаются по токопроводам, которые учитывают специфику таких частот, а именно, вытеснение тока к поверхности проводника (поверхностный эффект). При этом внутренние слои шин не работают, поэтому целесообразно использовать полые токопроводы. Толщина поверхностного проводящего слоя (t) обратно пропорциональна частоте:

$$t = 503 \sqrt{\frac{\rho_3}{\mu_0 f}}, \quad (8)$$

где ρ_3 – удельное электрическое сопротивление провода, μ_0 – относительная магнитная проницаемость материала шины.

В данном случае с увеличением частоты наружная площадь поперечного сечения проводника остается постоянной, но увеличивается площадь внутренней полости и уменьшается толщина стенок (t). Индуктивность провода при переходе от сплошного сечения к полому с уменьшением толщины стенки до $t \rightarrow 0$ снижается на 28 %.

Для расчета индуктивности полых токоприемников применялись соотношения:

– квадратного сечения:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{b} - 0,459 + \frac{2}{3} t \frac{1}{b} \right), \quad (9)$$

– круглого сечения:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{2c} - 1 \right). \quad (10)$$

Величина $c = q/r$ – соотношение внутреннего (q) и наружного (r) радиусов.

При расчете индуктивности полых токоприемников было принято условие постоянства площади сечения токопроводящей части проводов. С увеличением наружной и внутренней площадей сечения толщина стенки уменьшается. На рис. 3 представлены зависимости индуктивности и толщины стенок токопроводов от соотношения q/r для круглого токопровода и соотношения a/b для квадратного токопровода (a – сторона внутреннего квадрата при $S = \text{const}$).

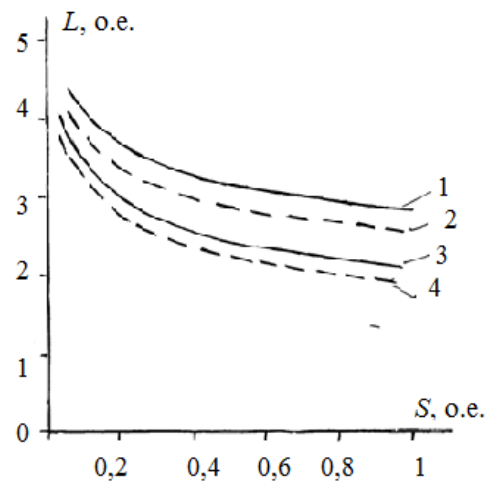


Рис. 1. Зависимости индуктивности шин от частоты (f) и площади поперечного сечения (S) в относительных единицах (1, 3 – при малых частотах; 2, 4 – при высоких частотах)

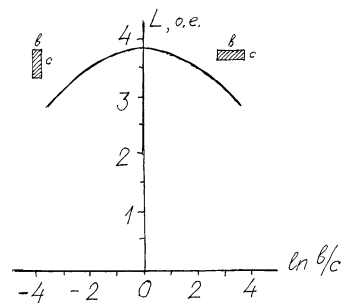


Рис. 2. Зависимость индуктивности шин прямоугольного сечения от соотношения сторон и расположения в пространстве

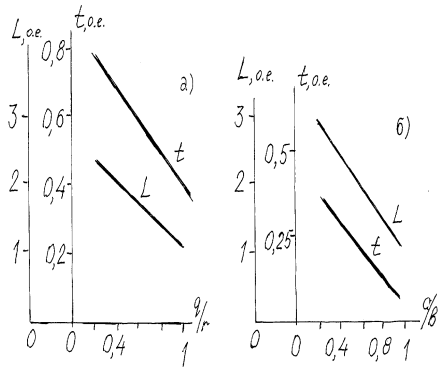


Рис. 3. (а) – зависимости $L = f(q/r)$ и $t = f(q/r)$ – для полых проводов круглого сечения; (б) – зависимости $L = f(a/b)$ и $t = f(a/b)$ – для полых проводов квадратного сечения

Выводы

1. Полые мощные токоподводы по сравнению со сплошными при постоянной площади токопроводящей поверхности имеют большую площадь поперечного сечения и, соответственно, меньшую индуктивность. Внутренняя полость может использоваться для охлаждающего агента.

2. Для уменьшения влияния поверхностного эффекта предпочтительно использование полых слаботочных токоподводов высоких и сверхвысоких частот.

3. Проводники круглого сечения при прочих равных условиях обладают меньшей индуктивностью, чем проводники квадратного и прямоугольного сечения.

4. У проводов прямоугольного сечения индуктивность меньше, чем у квадратного при той же площади поперечного сечения.

5. Индуктивность уменьшается с увеличением частоты.

Библиографический список

1. Повышение коэффициента мощности малых государственных предприятий / С. Г. Павлюс и др. // Совр. науч. вестник. 2011. – № 11(107), – С. 84-91.
2. Калантаров, П. П. Расчет индуктивностей / П. П. Калантаров, Л. А. Цейтлин.– Энергоатомиздат, 1985. – 484 с.
3. Выбор формы шин для питания потребителей большой мощности / В. И. Соборницкий и др. // Будущее исследований 2014: тезисы докл. X Междунар. науч.-техн. конфер. – София, 2014. Т. 48, – С. 67–69.
4. Варьирование геометрическими параметрами шин с целью уменьшения их индуктивности / В. И. Соборницкий и др. // Оралдын былым жаршысы, № 29 (160), 2016. – С. 77–81.

Ключові слова: індуктивність проводів і шин, частота, поверхневий ефект, площа поперечного перерізу проводу, порівняльний аналіз.

Ключевые слова: индуктивность проводов и шин, частота, поверхностный эффект, площадь поперечного сечения провода, сравнительный анализ.

Keywords: inductance wires and buses, frequency, skin effect, cross-section area of wire, comparative analysis.

Рецензенты:

д. т. н., проф., А. Б. Бойник,
д. ф.-м. н., проф., В. І. Гаврилюк.

Поступила в редколлегию 13.10.2016.

Принята к печати 28.10.2016.