

подобные вопросы в равной степени относятся и к преобразованиям Лапласа. В рассматриваемом нами подходе можно получить решения («оригиналы»), принципиально невозможные для традиционного способа преобразований Лапласа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко, А. В. Оператор О. Хевисайда и временные процессы в технических системах / А. В. Бондаренко, В. И. Можар // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 5. – С. 34–48.
2. Новые результаты теории двумерных систем. Двухмерные модели в пространственном состоянии, проблема их реализации и понятия управляемости, наблюдаемости и минимальности / Гун сун-Юань [и др.]. – ТИИР. – 1977. – Т. 65, № 6. – С. 157–176.
3. Бондаренко, А. В. Общая теория реализации активных RC-схем / А. В. Бондаренко, В. В. Бондаренко // Электричество. – 1983. – № 7. – С. 63–65.
4. Бондаренко, А. В. Синтез некоторых многомерных цифровых структур / А. В. Бондаренко // Радиоэлектроника. – 1996. – № 1. – С. 15–22.

Представлена кафедрой
электротехники и электроники БНТУ

Поступила 8.08.2007

УДК 623.316.35

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ПРОВОДНИКЕ, ИМЕЮЩЕМ ФОРМУ СПИРАЛИ

Канд. техн. наук, доц. ПАВЛОВЕЦ В. В., студ. ГЕРАСИМОВИЧ А. С.

Белорусский национальный технический университет

Постоянная тенденция к увеличению энергопотребления приводит к росту мощностей электроэнергетических систем и, как следствие, – к увеличению значений токов коротких замыканий. В энергетических системах даже на высоких напряжениях токи достигают десятков килоампер.

Уровень токов коротких замыканий в какой-то мере снижается применением токоограничивающих реакторов. Но сквозные токи коротких замыканий являются причиной механических повреждений обмоток реакторов и силовых трансформаторов большой мощности в результате действия электродинамических сил при взаимодействии магнитного поля и тока, протекающего в проводниках обмотки.

Известны численные методы расчета электродинамических усилий, действующих на проводник, имеющий форму дуги окружности [1] и форму винтовой линии [2]. Для исследования характера и направления действия электродинамических сил при расчете обмоток токоограничивающих реакторов и силовых трансформаторов на механическую прочность представляют интерес распределенные силы, действующие на проводник спиральной формы при протекании по нему электрического тока.

Рассмотрим магнитное поле ниточного проводника, имеющего форму спирали (рис. 1).

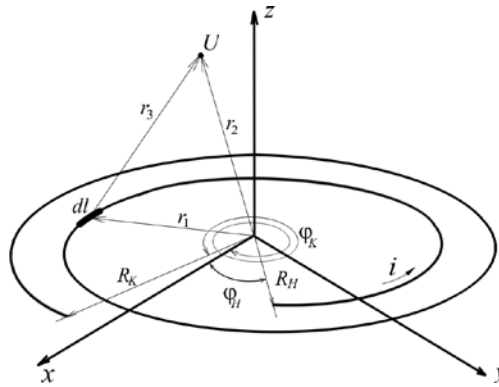


Рис. 1

Проводник имеет внутренний радиус R_H , внешний радиус R_K . Начало проводника смещено на угол φ_H на оси X декартовой системы координат. Сам проводник расположен в плоскости XOY . Проводник имеет дробное число витков N , или это число можно выразить углом, описываемым материальной точкой при движении от начала до конца спирального проводника $\varphi_K - \varphi_H = 2\pi N$.

Выделив элемент длины dl спирального проводника, перемещая его от начала до конца проводника при изменении угла φ от начального значения φ_H до конечного значения φ_K с шагом $d\varphi$, индукцию магнитного поля можно определить по закону Био-Савара [3]

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_{\varphi_H}^{\varphi_K} \frac{[\overline{dl} \times \overline{r_3}]}{|\overline{r_3}|^3} d\varphi, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Если задаться количеством K разбиений спирали на элементы длины, то $d\varphi = (\varphi_K - \varphi_H) / K$; $\overline{r_3}$ – радиус-вектор, проведенный из перемещаемого элемента длины dl в точку наблюдения U с координатами r_{2X}, r_{2Y}, r_{2Z} ; $[\overline{dl} \times \overline{r_3}]$ – векторное произведение векторов \overline{dl} и $\overline{r_3}$.

Если из начала координат провести к перемещаемому элементу длины dl радиус-вектор $\overline{r_1}$, то

$$\overline{r_3} = \overline{r_2} - \overline{r_1}. \quad (2)$$

При перемещении элемента длиной dl от начала до конца (изменяя угол φ от φ_H до φ_K) длина радиус-вектора будет изменяться. Запишем векторно-параметрическое уравнение спирали:

$$|\overline{r_1}| = R_H + \frac{R_K - R_H}{\varphi_K - \varphi_H} (\varphi - \varphi_H)$$

или

$$\begin{aligned}
 r_{1X} &= \left[R_H + \frac{R_K - R_H}{\varphi_K - \varphi_H} (\varphi - \varphi_H) \right] \cos \varphi; \\
 r_{1Y} &= \left[R_H + \frac{R_K - R_H}{\varphi_K - \varphi_H} (\varphi - \varphi_H) \right] \sin \varphi; \\
 r_{1Z} &= 0.
 \end{aligned} \tag{3}$$

При перемене мест внешнего и внутреннего радиусов выражения (3) остаются корректными.

Величину элемента длины можно выразить, продифференцировав:

$$d\bar{l} = \frac{d\bar{r}_1}{d\varphi} d\varphi; \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 dl_X &= \left\{ - \left[R_H + \frac{R_K - R_H}{\varphi_K - \varphi_H} (\varphi - \varphi_H) \right] \sin \varphi + \frac{R_K - R_H}{\varphi_K - \varphi_H} \cos \varphi \right\} d\varphi = m_X d\varphi; \\
 dl_Y &= \left\{ \left[R_H + \frac{R_K - R_H}{\varphi_K - \varphi_H} (\varphi - \varphi_H) \right] \cos \varphi + \frac{R_K - R_H}{\varphi_K - \varphi_H} \sin \varphi \right\} d\varphi = m_Y d\varphi; \\
 dl_Z &= m_Z d\varphi = 0.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Следует отметить, что величина элемента длины dl не является постоянным значением для всего проводника и изменяется при перемещении радиус-вектора r_1 по проводнику.

Раскрывая векторное произведение, входящее в (1), с учетом (3) и (2) получим:

$$\begin{aligned}
 B_X &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_{\varphi_H}^{\varphi_K} \frac{m_Y (r_{2Z} - r_{1Z})}{|r_3|^3} d\varphi; \\
 B_Y &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_{\varphi_H}^{\varphi_K} \frac{-m_X (r_{2Z} - r_{1Z})}{|r_3|^3} d\varphi; \\
 B_Z &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_{\varphi_H}^{\varphi_K} \frac{m_X (r_{2Y} - r_{1Y}) - m_Y (r_{2X} - r_{1X})}{|r_3|^3} d\varphi.
 \end{aligned} \tag{6}$$

При протекании тока на данный элемент длины проводника dl будет действовать электродинамическое усилие

$$dF = i[\bar{dl} \times \bar{B}]. \tag{7}$$

Раскрывая векторное произведение, аналогично (6), получим выражение для электродинамических усилий, действующих на элемент длины:

$$\begin{aligned} F_x &= idl_y B_z; \\ F_y &= -idl_x B_z; \\ F_z &= i(dl_x B_y - dl_y B_x). \end{aligned} \quad (8)$$

Однако эти усилия, выраженные в декартовых координатах, не дают полной характеристики механических сил, действующих на материал проводника. Очевидно, что на материал проводника будут действовать в радиальном направлении силы, стремящиеся разорвать проводник, и силы, стремящиеся повернуть проводник по окружности.

Радиальные и тангенциальные силы будут определяться в зависимости от положения выделенного элемента длины в соответствии с текущим углом φ :

$$\begin{aligned} F_\rho &= F_x \cos \varphi - F_y \sin \varphi; \\ F_\tau &= F_x \sin \varphi + F_y \cos \varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

F_ρ и F_τ характеризуют радиальные и тангенциальные усилия, действующие на выделенный элемент dl проводника в текущей точке. Если рассматривать силы, приводящие реальный проводник к деформированному состоянию, то это будет распределенная по длине нагрузка. Разделив силу на длину выделенного элемента, получим распределенную нагрузку (Н/м) на единицу длины проводника:

$$\begin{aligned} Q_\rho &= \frac{F_\rho}{|dl|}; \\ Q_\tau &= \frac{F_\tau}{|dl|}. \end{aligned} \quad (10)$$

На основе полученных выражений разработан комплекс программ для расчета магнитного поля спирального проводника, расчета электродинамических усилий и построения графиков распределенных радиальных и тангенциальных сил в проводнике, имеющем форму спирали.

Проведены расчеты электродинамических усилий на примере спиральной секции обмотки токоограничивающего реактора подстанции 750 кВ со следующими параметрами:

- начальный радиус спирали – 0,5 м;
- конечный радиус спирали – 2,5 м;
- число витков – 8;
- протекающий ток – 10 кА.

Графики распределенных электродинамических усилий, действующих в радиальном и тангенциальном направлениях на единицу длины провод-

ника, представлены на рис. 2, диапазоны значений электродинамических усилий по виткам спирали приведены в табл. 1.

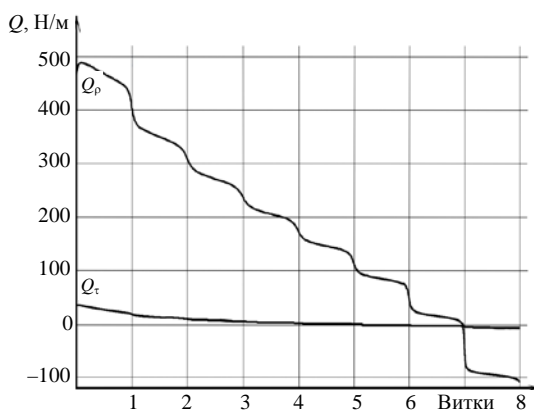


Рис. 2

Таблица 1

Диапазон значений электродинамических усилий по виткам спирали

Виток	Диапазон значений, Н/м	
	Q_p	Q_t
1	494,6–415,2	37,8–22,1
2	410,3–315,4	21,7–12,6
3	313,5–243,4	12,5–7,8
4	241,9–180,7	7,7–4,8
5	179,1–120,1	4,7–2,7
6	117,5–53,9	2,7–1,1
7	48,9–(-36,2)	0,98–(-0,6)
8	–(54,0–105,7)	–(0,9–1,7)

Анализ полученных результатов позволяет заметить интересные особенности. Наибольшие усилия как в радиальном, так и в тангенциальном направлении действуют на внутреннем витке проводника и уменьшаются от витка к витку. Радиальные усилия стремятся разорвать проводник, а тангенциальные – поворачивают участок проводника в направлении намотки. Приблизительно на седьмом витке усилия близки к нулю, а на крайний, восьмой виток, действуют как радиальные, так тангенциальные усилия противоположного знака, т. е. прижимающие крайний виток к самой обмотке и стремящиеся повернуть виток в направлении, обратном намотке.

Поскольку в большинстве публикаций, посвященных электродинамическим усилиям в обмотках трансформаторов и реакторов [4], обмотки представляются массивным телом, на которое действуют радиальные и осевые усилия, полученные в работе результаты позволяют по-новому оценить напряженное состояние проводников обмоток, рассматривать проводник как заземленную балку, нагруженную распределенными силами. Это позволит выбрать сечение проводника, обеспечивающее механическую прочность при минимальных материальных затратах на изготовление обмотки. При этом, конечно же, необходимо учесть влияние соседних секций обмотки и подводов к обмотке.

ВЫВОДЫ

1. Получено векторно-параметрическое уравнение проводника, имеющего форму спирали.
2. Получено выражение для расчета индукции магнитного поля, создаваемого проводником, имеющим форму спирали.
3. Получены выражения для расчета радиальных и тангенциальных сил, действующих на единицу проводника, имеющего форму спирали.
4. Результаты расчета показывают, что максимальные электродинамические усилия действуют на внутренний проводник, носят разрывной ха-

раक्टर в радиальном направлении и скручивают обмотку в тангенциальном направлении в сторону намотки. От витка к витку эти силы уменьшаются, а на внешний виток действуют сжимающие силы и стремятся повернуть его в сторону, противоположную намотке.

ЛИТЕРАТУРА

1. З а р е ц к и й, Е. Ф. Собственные электродинамические усилия проводника с током, имеющего форму дуги окружности / Е. Ф. Зарецкий // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1978. – № 7. – С. 22–26.
2. С т р е л ю к, М. И. Численный метод расчета электродинамических усилий в системе произвольно расположенных винтообразных проводников / М. И. Стрелюк, В. В. Павловец // Электричество. – 1981. – № 5. – С. 86–88.
3. Т а м м, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – М.: Наука, 1976. – 388 с.
4. Э л е к т р о д и н а м и ч е с к а я стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / под ред. А. И. Лурье // Труды ВЭИ. – М.: Знак, 2005. – 520 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 21.11.2007

УДК 621.311

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА СИГНАЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЙ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А.

Белорусский национальный технический университет

Надежность функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства определяется как надежностью схемы электрических соединений и силового электротехнического оборудования, так и достоверностью измерительной информации, характеризующей включенное или отключенное состояние коммутационных электрических аппаратов (дискретные переменные) и режимные параметры (аналоговые переменные).

Недостоверность результатов измерений аналоговых переменных (электрических токов, напряжений, активных и реактивных мощностей и энергий) и результатов сигнализации положений коммутационных электрических аппаратов (выключателей, разъединителей и их заземляющих ножей) приводит к неадекватной оценке дежурным диспетчерским персоналом режимов работы и фактических схем электрических соединений систем генерации, передачи и потребления электрической энергии. Это вызывает ошибочные действия оперативного персонала, что увеличивает вероятность возникновения аварийных ситуаций и снижает экономичность работы систем электроснабжения.