

УДК 621.313.282.2, 621.3.082.4

Ф. Р. ИСМАГИЛОВ, И. Х. ХАЙРУЛЛИН, Р. Р. САТТАРОВ, Л. Ш. ВАФИН

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВИБРАЦИОННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Рассматривается математическая модель линейного вибрационного преобразователя, являющегося основной частью сигнализатора гололеда на ЛЭП. Полученные выражения позволяют определить основные параметры и характеристики вибраций. *Гололедообразование на воздушных ЛЭП; сигнализатор гололеда; электромагнитный вибратор*

В настоящее время во многих областях техники широко используются линейные вибрационные электромеханические преобразователи. В данной работе рассмотрен электромагнитный вибратор, являющийся основной частью сигнализатора образования гололеда на ЛЭП [1]. Обнаружение образования гололеда на высоковольтных линиях является одним из элементов комплексной системы предотвращения и ликвидации гололедных аварий. Его внедрение на гололедоопасных участках электрической сети позволяет прогнозировать и фиксировать начало образования гололедных отложений, обеспечивать диспетчерские службы информацией о развитии гололедной ситуации, а также сокращает время на принятие решения по проведению организационно-технических мероприятий по предотвращению гололедных аварий, что существенно повышает эффективность борьбы с гололедом [2].

При обледенении проводов и тросов воздушных линий электропередачи меняется целый ряд физических, геометрических и других параметров линии. Это позволило сконструировать и построить датчики гололеда, основанные на различных способах определения появления или наличия гололеда на проводе. Известны разработки сигнализаторов гололеда, основанные на изменении веса проводов, на изменении условий распространения высокочастотных и импульсных сигналов и т. п. [2, 3].

Сигнализатор гололеда [1] интересен тем, что его работа мало зависит от параметров линии в отличие от вышеназванных сигнализаторов. Основные элементы его конструкции показаны на рис. 1: корпус 1 в форме муфты из проводящего тепло диамагнитного материала, одетый на провод 2; n ферромагнит-

ных хомутообразных пластин 3, жестко закрепленных на корпусе 1 на расчетном расстоянии друг от друга и с поворотом на угол $360^\circ/n$; микрофоны 4; передающее устройство; источник питания.

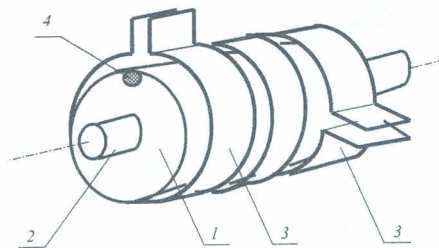


Рис. 1. Сигнализатор гололеда

Переменный ток в линейном проводе создает в ферромагнитных пластинках переменное магнитное поле. Возникающие при этом магнитные силы с удвоенной частотой притягивают упругие расположенные параллельно концы пластин друг к другу. При промышленной частоте $f = 50$ Гц движение концов пластин создает колебания воздуха в звуковом диапазоне, воспринимаемом человеческим слухом. Звуковой сигнал, сила которого зависит от величины токовой нагрузки в линейном проводе, микрофонами преобразуется в электромагнитный сигнал, транслируемый передатчиком.

При отложении гололеда на поверхности датчика уменьшаются амплитуда колебания концов пластин при неизменной частоте и сила звука, а также мощность излучаемого сигнала для данной токовой нагрузки, что позволяет определить наличие отложений. Лед, отложившийся на датчике, при борьбе с гололедными отложениями путем плавки удаляется автоматически. Восстановление силы звука говорит о полной очистке датчика.

Для проектирования таких сигнализаторов необходимо построить математическую модель физических процессов в электромагнитном вибраторе. В данной работе рассматриваются только электромагнитные процессы, которые определяют механические параметры вибраций (амплитуду и частоту). При этом принимаются следующие допущения:

- отсутствует рассеяние в основании пластин;
- отсутствуют потери в стали;
- магнитная проницаемость стали постоянна (отсутствует насыщение).

В общем случае распределение поля в рабочем зазоре вибратора трехмерно и не может быть определено аналитически. Наиболее целесообразно воспользоваться методом расчета магнитной цепи — методом участков.

Расчетная схема и основные размеры электромагнитного вибратора представлены на рис. 2.

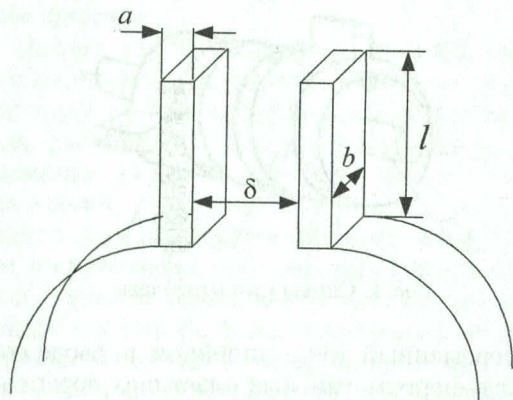


Рис. 2. Расчетная схема вибратора: a, b — размеры пластины; δ — величина воздушного рабочего зазора

Воздушный зазор разбивается на несколько участков. Каждому участку будет соответствовать сопротивление пластины r_k и сопротивление воздушного зазора $r_{\delta k}$ (где $k = \overline{1, n}$ и n — общее число участков). Если пластины разбиты на равные участки и отсутствует насыщение, то эти сопротивления равны и определяются следующим образом:

$$r_k = r = \frac{l}{\mu_0 ab} \cdot \frac{1}{n}; \quad (1)$$

$$r_{\delta k} = r_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 bl} n, \quad (2)$$

где μ — магнитная проницаемость материала пластин.

Тогда схема замещения магнитной цепи вибратора при разбиении на n участков может быть представлена в следующем виде (рис. 3).

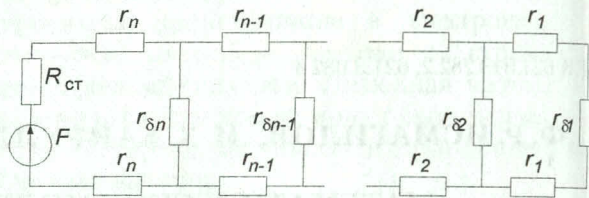


Рис. 3. Схема замещения вибратора

Для определения распределения потоков необходимо определить суммарное сопротивление рабочей области датчика. Эта область может быть замещена одним магнитным сопротивлением ($n = 1$)

$$R_1 = 2r_1 + r_{\delta 1}.$$

При замещении двумя сопротивлениями ($n = 2$)

$$R_2 = 2r_2 + r_{\delta 2} \parallel R_1 = 2r_2 + \frac{r_{\delta 2} R_1}{r_{\delta 2} + R_1}.$$

Далее аналогично:

$$R_k = 2r_k + r_{\delta k} \parallel R_{k-1} = 2r_k + \frac{r_{\delta k} R_{k-1}}{r_{\delta k} + R_{k-1}};$$

...

$$R_n = 2r_n + r_{\delta n} \parallel R_{n-1} = 2r_n + \frac{r_{\delta n} R_{n-1}}{r_{\delta n} + R_{n-1}}. \quad (3)$$

При достаточно большом числе участков n добавление еще одного участка не изменит результирующего сопротивления, т. е.

$$R_n = R_{n-1} = R_{\infty} \quad \text{при} \quad n \rightarrow \infty.$$

Тогда из (3) можно получить уравнение для определения этого сопротивления R_{∞} (предполагается, что участки одинаковы):

$$R_{\infty} = 2r + r_{\delta} \parallel R_{\infty} = 2r + \frac{r_{\delta} R_{\infty}}{r_{\delta} + R_{\infty}},$$

откуда следует, что

$$R_{\infty} = r \pm \sqrt{r^2 + 2r \cdot r_{\delta}}.$$

Знак « \pm » в этой формуле не имеет физического смысла, так как соответствует отрицательному активному сопротивлению. Тогда с учетом (1) и (2) при $n \rightarrow \infty$ можно получить

$$R_{\infty} = \sqrt{2 \frac{1}{\mu_0 ab} \cdot \frac{\delta}{\mu_0 b}}$$

или

$$R_{\infty} = \sqrt{R_{M0}/G_{M0}}, \quad (4)$$

где $R_{M0} = 2 \frac{1}{\mu\mu_0 ab}$ — продольное магнитное сопротивление двух пластин на единицу длины; $G_{M0} = \frac{\mu_0 b}{\delta}$ — поперечная магнитная проводимость рабочего зазора на единицу длины.

Выражение (4) для R_{∞} совпадает с волновым сопротивлением длинной линии [4]. Таким образом, при бесконечно большом числе участков сопротивление рабочей области, как и следовало ожидать, равно волновому сопротивлению.

Формулы (2), (3) дают возможность рассчитать суммарное магнитное сопротивление при любом количестве участков. Схема замещения, в которой зазор заменен одним сопротивлением, представлена на рис. 4.

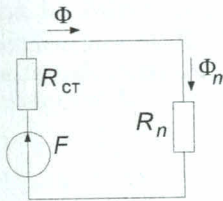


Рис. 4. Упрощенная схема

Для определения потоков в ветвях схемы замещения необходимо ее «развернуть». Суммарный поток из упрощенной схемы замещения имеет вид

$$\Phi = \Phi_n = \frac{F}{R_{ct} + R_n}. \quad (5)$$

На следующем шаге имеем схему замещения, представленную на рис. 5.

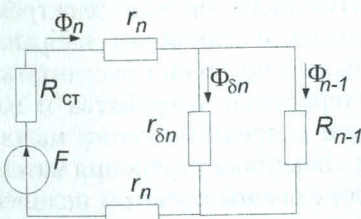


Рис. 5. Схема замещения для определения потоков $\Phi_{\delta n}$ и Φ_{n-1}

Из этой схемы следует, что

$$\begin{aligned} \Phi_{n-1} &= \Phi_n \frac{r_{\delta n}}{r_{\delta n} + R_{n-1}}; \\ \Phi_{\delta n} &= \Phi_n \frac{R_{n-1}}{r_{\delta n} + R_{n-1}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично (6) определяются потоки через остальные элементы:

$$\begin{aligned} \Phi_{k-1} &= \Phi_k \frac{r_{\delta k}}{r_{\delta k} + R_{k-1}}; \\ \Phi_{\delta k} &= \Phi_k \frac{R_{k-1}}{r_{\delta k} + R_{k-1}}. \end{aligned} \quad (7)$$

На последнем шаге

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_2 \frac{r_{\delta 2}}{r_{\delta 2} + R_1}; \\ \Phi_{\delta 2} &= \Phi_2 \frac{R_1}{r_{\delta 2} + R_1}; \\ \Phi_{\delta 1} &= \Phi_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Выражения (6)–(8) позволяют определить магнитные потоки во всех элементах схемы замещения.

Электромагнитная сила определяется изменением проводимости воздушного зазора [5]. Для k -го элемента составляющая силы будет

$$f_{\text{эм}k} = \frac{1}{2} \Phi_{\delta k}^2 \frac{\partial r_{\delta k}}{\partial \delta}. \quad (9)$$

Производная проводимости при равномерном разбиении воздушного зазора

$$\frac{\partial r_{\delta k}}{\partial \delta} = \frac{\partial r_{\delta}}{\partial \delta} = \frac{1}{\mu_0 b l} n = \frac{r_{\delta}}{\delta}.$$

С учетом этого электромагнитная сила k -го элемента будет определяться выражением

$$f_{\text{эм}k} = \frac{1}{2} \Phi_{\delta k}^2 \frac{r_{\delta}}{\delta}.$$

Суммарная сила, действующая на всю пластину, определится как

$$f_{\text{эм}} = \sum_{k=1}^n f_{\text{эм}k} = \frac{r_{\delta}}{2\delta} \sum_{k=1}^n \Phi_{\delta k}^2. \quad (10)$$

На рис. 6 и 7 представлены результаты расчетов электромагнитной силы по (10). Из этих зависимостей видно, что тяговые характеристики имеют характерный для электромагнитов вид. С увеличением тока в линии электромагнитная сила существенно возрастает (рис. 6). Увеличение числа участков более 10, как видно из рис. 7, нецелесообразно, так как не приводит к существенному увеличению точности в определении силы.

В рассматриваемом электромагнитном преобразователе колебания носят сложный характер, так как сопротивление воздушного

зазора и насыщение ферромагнитных участков меняется вдоль пластин. При малых колебаниях, однако, можно считать, что воздушный зазор постоянен и сила изменяется по следующему закону:

$$f_{\text{ЭМ}}(t) = f_{\text{ЭМ}} \cdot (1 - \cos 2\omega t), \quad (11)$$

где $f_{\text{ЭМ}}$ определяется по действующему значению МДС в соответствии с (10); ω — угловая частота сети.

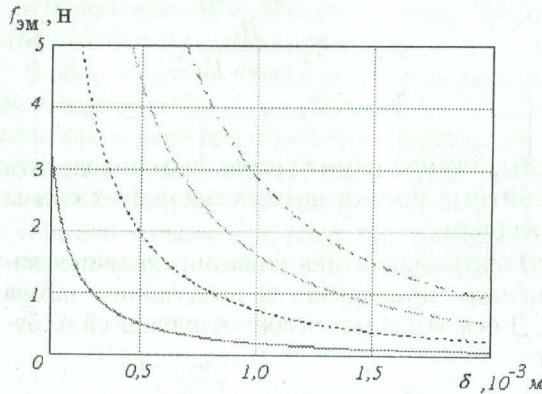


Рис. 6. Тяговые характеристики при МДС 50 А (—); 100 А (-----); 150 А (---); 200 А (— · — · —)

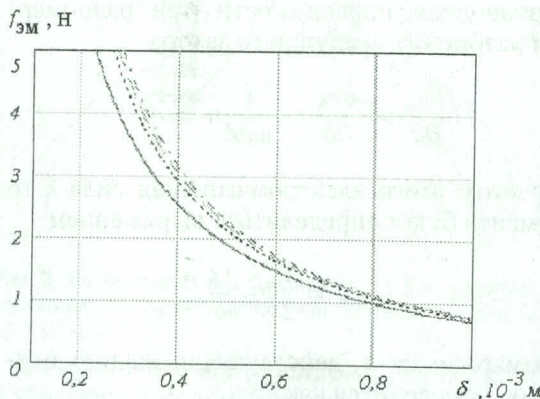


Рис. 7. Тяговые характеристики при n , равном 5 (—); 10 (-----); 15 (---); 25 (— · — · —)

Тогда также можно считать, что пластина представляет колебательную систему с сосредоточенной массой. Уравнение колебаний может быть записано как

$$\ddot{y} + 2\delta\dot{y} + \omega_0^2 y = f_{\text{ЭМ}}^* (1 - \cos 2\omega t),$$

где $f_{\text{ЭМ}}^* = \frac{f_{\text{ЭМ}}}{m}$; $\delta = \frac{c}{2m}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$; y — отклонение (вибрация) пластины от положения равновесия. Решение этого уравнения в установившемся режиме будет ($t \rightarrow \infty$):

$$\begin{aligned} y_{\text{уст}}(t) &= y_{\text{ср}} - y_m \cos(2\omega t - \varphi), \\ v_{\text{уст}}(t) &= -2\omega y_m \sin(2\omega t - \varphi), \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$y_{\text{ср}} = \frac{f_{\text{ЭМ}}}{2\omega_0^2} \text{ — среднее положение пластины;}$$

$y_m = \frac{f_{\text{ЭМ}}}{2\sqrt{(\omega_0^2 - 4\omega^2)^2 + (4\delta\omega)^2}}$ — амплитуда вынужденных колебаний;

$\varphi = \arctg \frac{4\omega\delta}{\omega_0^2 - 4\omega^2}$ — сдвиг фаз между вынуждающей силой и вынужденными колебаниями.

Таким образом, установившиеся колебания будут представлять собой колебания вокруг $y_{\text{ср}}$ с двойной частотой сети (100 Гц), амплитуда которых y_m . Здесь будет иметь место характерное явление резонанса. На рис. 8 представлены зависимости резонансных кривых для амплитуды от собственной частоты механической колебательной системы. При этом зафиксирована частота вынуждающей силы, а переменным параметром является декремент затухания.

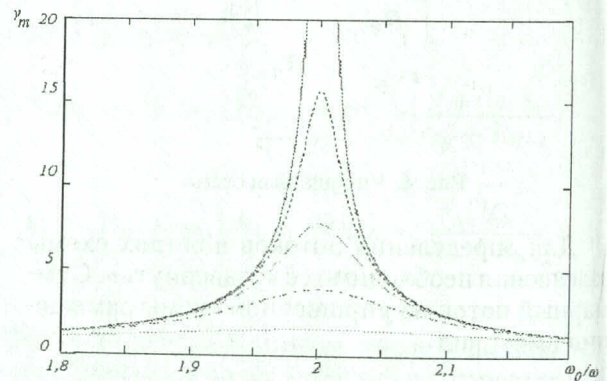


Рис. 8. Амплитуда колебаний в зависимости от собственной частоты для δ , равной 1 (—); 5 (-----); 10 (---); 20 (— · — · —); 50 (— · — · —)

Математическая модель электромагнитных процессов в линейном вибрационном преобразователе позволяет рассчитать основные характеристики устройства и параметры вибрации в предположении малости колебаний. Дальнейшие уточнения математической модели связаны с учетом нелинейности кривой намагничивания и потерь в стали на перемагничивание и гистерезис, которые могут оказать существенное влияние при малом воздушном зазоре. Кроме того, при больших колебаниях (относительно малая жесткость пластины) необходимо рассмотреть колебания пластины как двухмерной распределенной системы, на которую действует распределенная вынуждающая электромагнитная сила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. РФ № 2219634. Сигнализатор гололедных отложений / И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, Л. Ш. Вафин, И. Ш. Вафин // Бюл. № 35 от 20.12.2003.
2. **Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Вафин Л. Ш., Вафин И. Ш.** Сигнализаторы гололедных отложений на проводах высоковольтной линии. Анализ современного состояния проблемы // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2003. С. 161–165.
3. **Рудакова Р. М., Вавилова И. В., Голубков И. Е.** Борьба с гололедом в электросетевых предприятиях: Пособие по вопросам организации борьбы с гололедом. Уфа: УГАТУ, 1995. 97 с.
4. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. 7-е изд. М.: Высш. шк., 1978. 528 с.
5. **Иванов-Смоленский А. В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высшая школа, 1989. 312 с.

ОБ АВТОРАХ



Исмагилов Флор Рашитович, проф., зав. кафедрой электромеханики, проректор УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Тр. в обл. электромеханических преобразователей энергии.



Хайруллин Ирек Ханифович, проф. той же кафедры. Дипл. инж.-электромеханик (Ивановск. энергетич. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УАИ, 1981). Тр. по электромеханическим преобразователям энергии.



Саттаров Роберт Радилевич, доцент той же кафедры. Дипл. физик-геофизик (БГУ, 1996). Канд. техн. наук по элементам и системам управления (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. электромеханических преобразователей энергии.



Вафин Линар Шайхулович, инженер Демских электр. сетей г. Уфы. Дипл. инж.-электромеханик (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. электромеханических преобразователей энергии.