

УДК 621.314:621.315

Ф. Р. ИСМАГИЛОВ, Р. Р. САТТАРОВ, Л. Ш. ВАФИН**ВИБРАЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
ДЛЯ СИГНАЛИЗАТОРА ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ
НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Рассмотрены вибрационные электромеханические преобразователи, являющиеся основой сигнализаторов гололеда на ЛЭП. Получена математическая модель, учитывающая нелинейные свойства магнитных материалов и распределенный характер масс и упругости. Определены основные параметры и характеристики преобразователя и сигнализатора гололеда на его основе. Расхождение экспериментальных и расчетных данных составляет не более 15%. *Гололедообразование на воздушных ЛЭП; сигнализатор гололеда; электромеханический вибрационный преобразователь*

В условиях увеличения требований к надежности электрических сетей актуальна проблема предотвращения серьезных повреждений из-за гололедообразования на воздушных линиях электропередач. В настоящее время в этой области имеется большое количество реально действующих и экспериментально проверенных систем борьбы с гололедом [1]. Основным способом борьбы с гололедными отложениями является их плавка большими токами (повышенная нагрузка, короткое замыкание и т. д.). Одна из важнейших задач при плавке гололеда — фиксирование начала гололедообразования, наблюдение за интенсивностью отложения льда и его размерами. 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. [1]. Однако надежность, точность, технологичность и экономические показатели действующих устройств борьбы с гололедными образованиями на проводах высоковольтных линий еще очень невысоки и поэтому продолжается поиск новых технических решений для сигнализаторов гололедообразования.

На кафедре электромеханики УГАТУ предложен сигнализатор гололедообразова-

ния [2], основным элементом которого является вибрационный электромеханический преобразователь (ВЭПСГ). Основным достоинством данного сигнализатора является простота конструкции и эксплуатации при достаточной точности определения гололедных отложений. В [3] представлена математическая модель электромагнитных процессов в вибрационном преобразователе при допущении линейности магнитной характеристики. Для получения большой амплитуды вибраций необходимо уменьшать толщину пластин преобразователя, что приводит к насыщению материала пластин в вибрационном преобразователе. Таким образом, математическая модель электромагнитных процессов должна учитывать нелинейность кривой намагничивания. Кроме того, механические колебания в [3] исследованы без учета распределения электромагнитной силы, массы и упругости вдоль пластин ВЭПСГ. В исследуемом преобразователе магнитный поток и электромагнитная сила максимальны у основания и равны нулю на концах пластин, пренебрежение этим может привести к большим погрешностям при определении величины гололедных отложений.

Основная цель данной работы — создание математической модели электромеханических процессов в ВЭПСГ с учетом нелинейности магнитных характеристик и распределенного характера электромагнитной силы, массы и упругости.

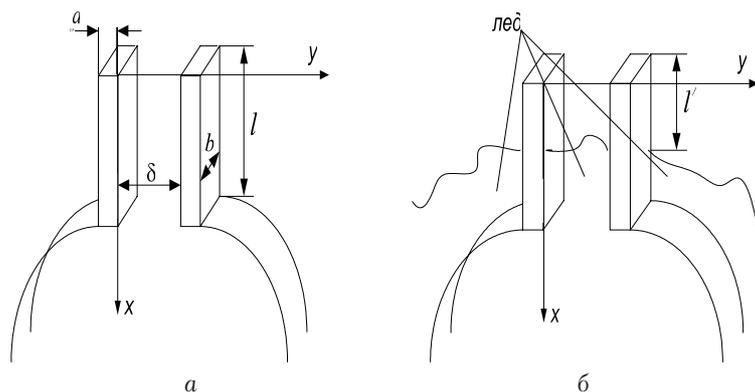


Рис. 1. Расчетная схема и основные размеры ВЭПСГ: *a* – без льда: *l* – длина пластины; δ – величина воздушного рабочего зазора; *a*, *b* – размеры пластины; *b* – со льдом: *l'* – свободная длина пластины, не фиксированная льдом

Распределение электромагнитного поля в рабочем зазоре вибрационного преобразователя трехмерно и его точное аналитическое определение с помощью методов теории поля весьма сложно. Для подобных электромеханических преобразователей с успехом применяются методы расчета на основе представления о магнитной цепи, которые при относительной простоте позволяют получить достаточную точность [3]. При расчете преобразователей с распределенными параметрами наиболее просто воспользоваться методом участков расчета магнитной цепи, который позволяет учесть нелинейные характеристики магнитных материалов.

Расчетная схема и основные размеры электромеханического вибрационного преобразователя представлены на рис. 1. Предполагается, что действие гололедных отложений проявляется в жесткой фиксации части пластин у основания. Это допущение подтверждается прямой экспериментальной проверкой.

Воздушный зазор исследуемого ВЭПСГ необходимо разбить на несколько участков, при этом схема замещения магнитной цепи при разбиении на *n* участков может быть представлена так же, как в [3]. На этой схеме кольцевому ферромагнитному магнитопроводу соответствует нелинейное комплексное магнитное сопротивление $Z_{ст} = \rho_Z(B) \frac{l_{ст}}{S_{ст}}$ (*l*_{ст} – длина и *S*_{ст} – площадь поперечного сечения магнитопровода).

Каждому участку ферромагнитных пластин преобразователя будут соответствовать комплексные магнитные сопротивления z_k , а соответствующим участкам рабочего воздушного зазора – магнитное сопротивление $r_{\delta k}$ ($k = \overline{1, n}$ и *n* – общее число участков). Если разделить пластины на равные участки,

то магнитные сопротивления участков ферромагнитных пластин равны и определяются следующим образом:

$$z_k = z = \rho_Z(B) \frac{l}{ab} \frac{1}{n}, \tag{1}$$

где $\rho_Z(B) = \frac{\dot{H}}{B} = \rho_R(B) + j\rho_X(B)$ – удельное магнитное сопротивление материала пластин.

При определении сопротивлений участков воздушного зазора необходимо учесть поля выпучивания, которые могут быть значительны при больших рабочих зазорах. С учетом сказанного, при равномерном разбиении на участки магнитные сопротивления участков рабочего зазора будут следующими [3]:

$$r_{\delta k} = r_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \left(b + \frac{k\delta}{\pi} \right) \frac{l}{n}}, \tag{2}$$

где $k = 1, 0$ при $\frac{a}{\delta} < 1$ и $k = 0, 307$ при $\frac{a}{\delta} \geq 1$.

Для определения электромагнитной силы необходимо определить значения магнитных потоков в элементах схемы замещения, соответствующих воздушному зазору между пластинами: $\Phi_{\delta 1}, \Phi_{\delta 2}, \dots, \Phi_{\delta n}$. В достаточно широком диапазоне изменения магнитной индукции активное и реактивное магнитное сопротивление можно считать приближенно постоянными, например для электротехнической стали $1212 \rho_R \approx \text{const}, \rho_X \approx \text{const}$ при изменении индукции в пределах от 0,2 до 1,2 Тл. В этом случае можно принять допущение о постоянстве магнитной проницаемости стали магнитопровода (отсутствует насыщение) и постоянных потерях в магнитопровод, равных некоторому среднему значению в рассматриваемом диапазоне изменения индукции. В такой линейной постановке задачи магнитные потоки были определены в [3].

Для определения магнитных потоков с учетом насыщения магнитной цепи необходимо учитывать нелинейную зависимость сопротивления ферромагнитных участков от величины потока в них. При использовании современных вычислительных средств наиболее целесообразно применять линейную интерполяцию зависимости удельного магнитного сопротивления материала пластин от магнитной индукции, так как при этом достигается достаточная точность и для этой процедуры существуют стандартные функции в математических пакетах [4].

Для исследуемого преобразователя при равномерном разбиении на n участков нелинейные уравнения, составленные по методу контурных токов, будут следующими:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_n \left[Z_{\text{CT}}(\dot{\Phi}_n) + 2z(\dot{\Phi}_n) + r_\delta \right] - \dot{\Phi}_{n-1} r_\delta &= \dot{F}; \\ \dots & \\ 2\dot{\Phi}_k \left[1 + \frac{z(\dot{\Phi}_k)}{r_\delta} \right] &= \dot{\Phi}_{k+1} + \dot{\Phi}_{k-1} \quad (k = \overline{n-1, 2}); \\ \dots & \\ 2\dot{\Phi}_1 \left[1 + \frac{z(\dot{\Phi}_1)}{r_\delta} \right] &= \dot{\Phi}_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение этой системы уравнений может быть получено только численными методами. В настоящее время разработано достаточно большое количество методов решения нелинейных уравнений: метод простой итерации, метод половинного деления, метод Ньютона и др. Все эти методы требуют задания начального приближения или границ интервалов, в пределах которого находится решение уравнения. Реализация этих методов на ЭВМ для системы нелинейных уравнений достаточно сложна и требует навыков программирования и анализа результатов вычислений. В то же время современные математические пакеты (MathCAD, MatLab, Mathematica, Maple и др.) предоставляют стандартные функции для решения систем алгебраических уравнений. При этом эффективность и точность встроенных алгоритмов достаточна высока [4].

После того как получены потоки в пластинах преобразователя, магнитные потоки в воздушном зазоре определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{\delta 1} &= \dot{\Phi}_1; \\ \dot{\Phi}_{\delta k} &= \dot{\Phi}_k - \dot{\Phi}_{k-1} \quad (k = \overline{2, n}). \end{aligned}$$

Решение нелинейной системы (3) было произведено с помощью пакета MathCAD. В этом пакете реализованы градиентные численные методы решения нелинейных уравнений с некоторыми модификациями [4]: метод сопряженных градиентов (Conjugate Gradient), квази-ньютоновский метод (Quasi-Newton) и Левенберга (Levenberg-Marquardt). При этом коэффициенты и неизвестные могут быть комплексными функциями. Все эти методы являются локально сходящимися и требуют установки начального приближения. В качестве начального приближения целесообразно принять решение, полученное в линейном приближении в [3]. Максимальная абсолютная погрешность решения системы нелинейных уравнений для потоков должна быть установлена не более 10^{-9} Вб.

Ряд проведенных расчетов показывает, что при достаточно больших МДС и малых зазорах возможно большое расхождение между линейной и нелинейными моделями (до 80%). Как следует из распределения потоков, наибольшему насыщению подвержено начало пластины (n -й элемент), а наименьшему — конец пластины (1-й элемент).

Среднее значение электромагнитной силы, как показано ранее, определяется изменением проводимости воздушного зазора [3, 5]. Для k -го элемента схемы замещения составляющая силы будет

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

С учетом выражения (2) для магнитного сопротивления воздушного зазора электромагнитная сила k -го элемента будет определяться выражением

$$f_{\text{ЭМ}k} = \frac{1}{2} |\Phi_{\delta k}|^2 \frac{r_\delta}{\delta} \frac{b}{(b + \frac{k\delta}{\pi})}. \quad (4)$$

Полученное выражение (4) позволяет определить распределение электромагнитной силы вдоль зазора. При увеличении числа участков n сила $f_{\text{ЭМ}k}$, так же как и длина участка, будет убывать обратно пропорционально n , так что при $n \rightarrow \infty$ сила $f_{\text{ЭМ}k}$ и длина участка будут стремиться к нулю. Если ввести отношение силы на k -м участке к длине этого участка, то можно получить линейную плотность электромагнитной силы $Q_{\text{ЭМ}k}$, которая определяет интенсивность нагрузки пластин вибрационного преобразователя:

$$Q_{\text{ЭМ}k} = \frac{f_{\text{ЭМ}k}}{l/n} = \frac{1}{2} |\Phi_{\delta k}|^2 \frac{r_\delta}{\delta} \frac{b}{(b + \frac{k\delta}{\pi})} \frac{n}{l}. \quad (5)$$

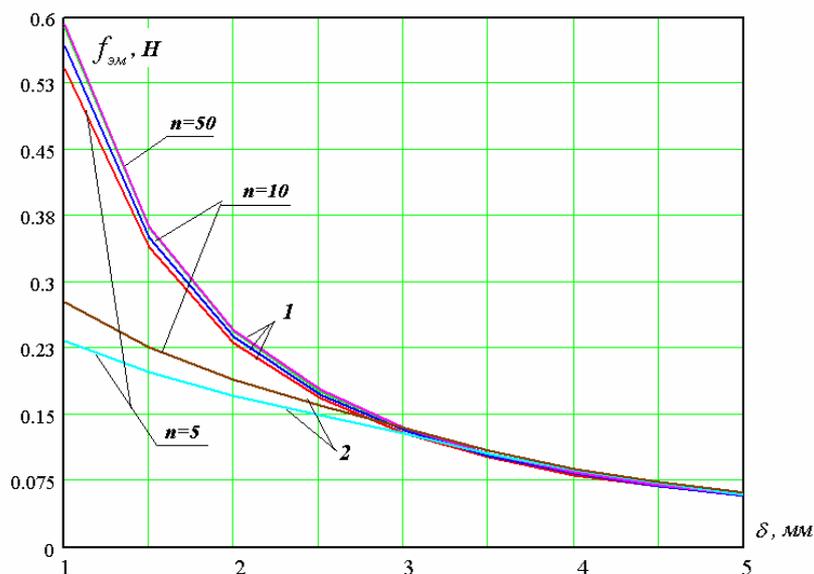


Рис. 2. Тяговые характеристики при $F=100$ А с учетом (2) и без учета (1) насыщения

При увеличении числа участков линейная плотность силы (5) будет стремиться к определенному пределу, который следует принять за значение линейной плотности силы на данном участке. Распределение линейной плотности электромагнитной силы $Q_{ЭМ}(x)$ тогда можно считать ступенчатой функцией.

Результаты расчетов по (5) позволяют сделать вывод, что в практических расчетах вполне пригодны результаты, получаемые при числе участков $n = 10$. При сравнении кривых распределения силы с учетом насыщения с соответствующей кривой, полученной в линейном приближении, можно сделать вывод о существенном влиянии насыщения на величину линейной плотности электромагнитной силы.

Влияние нелинейных свойств ферромагнитных материалов целесообразно оценивать по суммарной или средней силе, действующей на пластины вибрационного преобразователя. Суммарная сила, действующая на всю пластину, определится суммированием по всем участкам:

$$f_{ЭМ} = \sum_{i=1}^n f_{ЭМi} = \frac{r_{\delta}}{2\delta} \frac{b}{(b + \frac{k\delta}{\pi})} \sum_{i=1}^n |\Phi_{\delta i}|^2. \quad (6)$$

В зависимости от того, какое значение потока в зазоре использовать — с учетом насыщения или без его учета, можно соответственно получить значение суммарной силы с учетом нелинейных магнитных характеристик или в линейном приближении. Опреде-

ля по (6) значение суммарной силы при разных величинах воздушного зазора, можно получить статические тяговые характеристики.

На рис. 2 представлены статические тяговые характеристики, полученные в результате расчетов электромагнитной силы по (6). Из этих зависимостей видно, что тяговые характеристики имеют характерный для электромагнитов вид. Из сравнения этих кривых можно сделать вывод о том, что при относительно малых МДС и больших зазорах насыщением можно пренебречь. Увеличение тока в линии приводит к возрастанию магнитного потока и насыщению пластин преобразователя, поэтому электромагнитная сила возрастает не по квадратичному закону, а существенно медленнее. Таким образом, при определении электромагнитной силы необходимо учитывать нелинейный характер магнитного сопротивления.

При использовании ферромагнитных материалов с большей индукцией насыщения величина МДС, при которой сказывается насыщение, увеличивается, а величина зазора — уменьшается. К тому же результату приводит увеличение толщины пластины преобразователя, однако при этом уменьшается амплитуда вибраций пластин и соответственно снижается полезный сигнал сигнализатора гололедообразования.

Кроме того, при малых вибрациях пластин, и, следовательно, малых изменениях воздушного зазора, силу можно считать примерно постоянной. При этом, как следует из

проведенных расчетов, чем больше воздушный зазор, тем при больших амплитудах вибраций это верно. Проведенные расчеты показывают, что при изменении рабочего зазора в пределах 5% изменение силы, определенное с учетом насыщения, составляет не более 7%.

Вынужденные поперечные колебания пластин вибрационного преобразователя описываются уравнением [6]

$$\eta^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - 2D \frac{\partial y}{\partial t} + q(x, t), \quad (7)$$

где $D = \frac{c}{2m}$ — коэффициент затухания; $q(x, t) = \frac{Q_{ЭМ}(x, \delta)[1 - \cos 2\omega t]}{m}$ — удельная плотность внешней электромагнитной силы; $\eta = \sqrt{\frac{r}{m}} = \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}} = \sqrt{\frac{Ea^2}{12\rho}}$; EJ — жесткость при изгибе; $m = \rho S$ — масса единицы длины.

Здесь принято допущение, что электромагнитная сила не зависит от зазора, т.е. при малых вибрациях амплитуду электромагнитной силы можно приближенно считать постоянной.

Так как внешнюю электромагнитную силу можно представить как произведение функций только времени и только координаты x , то возможно применить метод разделения переменных к рассматриваемой краевой задаче. При этом целесообразно получить решение для уравнения свободных колебаний в виде собственных функций, а затем решение задачи о вынужденных колебаниях в виде ряда по собственным функциям. Собственные функции, определенные с точностью до произвольной постоянной, для этого случая будут следующими:

$$X_i(x) = S(k_i x)S(k_i l') - T(k_i x)V(k_i l'), \quad (8)$$

где k_i — корни характеристического уравнения

$$\cos kl' = -\frac{1}{\operatorname{ch} kl'}.$$

В установившемся режиме колебаний поперечное динамическое перемещение y_e , обусловленное действием распределенной поперечной нагрузки $Q_{ЭМ}(x, t)$, может быть получено в виде следующего разложения по собственным функциям:

$$y_e(x, t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x) \frac{\beta_i}{\alpha_i} \times \left(\frac{1}{p_i^2} - \frac{\cos(2\omega t - \chi)}{\sqrt{(p_i^2 - 4\omega^2)^2 + (4D\omega)^2}} \right). \quad (9)$$

где $p_i = \eta k_i^2$ — собственные частоты; $\chi = \arctg \frac{4D\omega}{(p_i^2 - 4\omega^2)}$ — сдвиг по фазе вынужденных колебаний относительно силы; $\alpha_i = \int_0^{l'} X_i^2(x) dx$; $\beta_i = \int_0^{l'} Q_{ЭМ}(x, \delta) X_i(x) dx$ — коэффициенты разложения линейной плотности электромагнитной силы в ряд по собственным функциям.

Микрофон сигнализатора воспринимает колебания всей пластины вибрационного преобразователя, поэтому необходимо определить средние колебания пластины

$$y_{cp}(t) = \frac{1}{l'} \int_0^{l'} y_e(x, t) dx.$$

Подставляя в это выражение формулу (9), можно получить

$$y_{cp}(t) = y_0 - A_{2\omega} \cos(2\omega t - \chi), \quad (10)$$

где $y_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \frac{\beta_i}{\alpha_i p_i^2}$ — статический прогиб (первая сумма), соответствующий постоянной составляющей электромагнитной силы; $\lambda_i = \frac{1}{l'} \int_0^{l'} X_i(x) dx$.

Амплитуда колебаний здесь определяется следующим образом:

$$A_{2\omega} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\beta_i}{\alpha_i} \times \frac{\lambda_i}{\sqrt{(p_i^2 - 4\omega^2)^2 + (4D\omega)^2}}. \quad (11)$$

Колебания воздуха, воспринимаемые микрофоном сигнализатора, будут пропорциональны амплитуде $A_{2\omega}$. Точный характер этой зависимости определить затруднительно, так как при этом необходимо решать сложную акустическую задачу об излучении и распространении звуковых волн электро-механическим вибрационным преобразователем. Коэффициент пропорциональности, однако, можно определить опытным путем. Таким образом, необходимо установить зависимость амплитуды колебаний двойной частоты $A_{2\omega}$ от величины гололедных отложений $h = l - l'$.

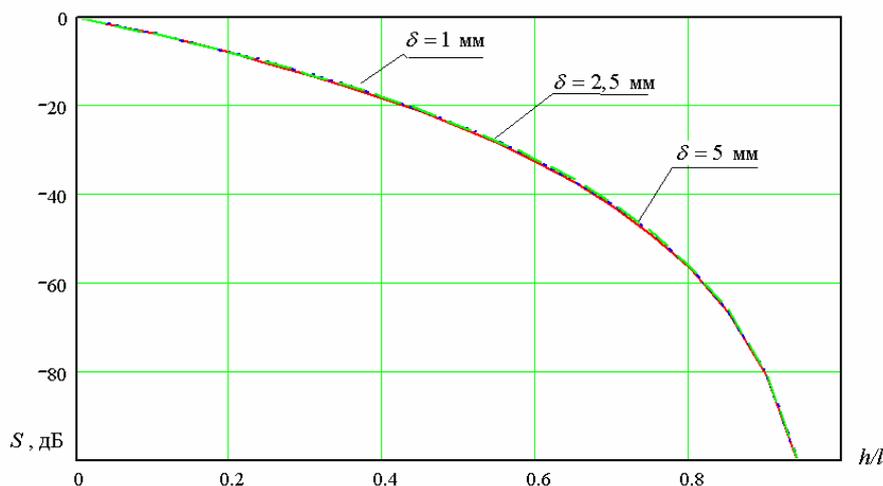


Рис. 3. Зависимость коэффициента ослабления от величины гололедных отложений ($F = 50A$)

Бесконечная сумма в полученном выражении для амплитуды колебаний (11) заменяется конечной, так как члены ряда достаточно быстро уменьшаются. При проведении расчетов было определено, что уже при количестве членов ряда равном 5, получается достаточная точность и в увеличении количества членов ряда более 5 нет необходимости.

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, получаемое с микрофона сигнализатора гололеда, будет пропорционально амплитуде вибраций

$$U_{\text{вых}} = K_A A_{2\omega}, \quad (12)$$

где K_A — опытный коэффициент пропорциональности сигнализатора (мВ/мкм).

Полученные выражения (11) и (12) позволяют оценить влияние гололедных отложений на сигнал датчика гололедообразования. Так как выходное напряжение сигнализатора пропорционально амплитуде вибраций пластин $A_{2\omega}$, то целесообразно ввести следующее отношение:

$$s = 20 \lg \frac{A_{2\omega}}{A_{2\omega}|_{h=0}}, \quad (13)$$

где $A_{2\omega}|_{h=0}$ — амплитуда вибраций при отсутствии гололеда.

Амплитуда вибраций при отсутствии гололеда, как следует из (11), является максимальной амплитудой вибраций и выражение (13) определяет некоторый коэффициент ослабления амплитуды из-за гололедных отложений.

Это отношение, с другой стороны, может быть определено и через выходные напряже-

ния сигнализатора гололедообразования:

$$s = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}|_{h=0}}, \quad (14)$$

где $U_{\text{вых}}|_{h=0}$ — выходное напряжение при отсутствии гололеда.

По выражению (13) с помощью (11) коэффициент ослабления сигнала может быть определен расчетным путем, а с использованием (14) — по результатам измерений.

На рис. 3 представлены зависимости расчетного коэффициента ослабления сигнала от величины гололедных отложений h при различных рабочих зазорах и фиксированной МДС ($F = 50A$). Из этих зависимостей следует, что величина коэффициента ослабления практически не зависит от величины воздушного зазора. Кроме того, ряд проведенных расчетов показал, что расчетный коэффициент ослабления практически не зависит и от величины МДС. В то же время величины зазора и МДС определяют максимальную амплитуду вибраций $A_{2\omega}|_{h=0}$, а следовательно, и максимальный уровень выходного напряжения $U_{\text{вых}}|_{h=0}$.

Результаты расчетов коэффициента ослабления сигнала без учета насыщения практически совпадают с рассчитанными с учетом нелинейных свойств магнитных материалов (расхождение не более 2%). Таким образом, при определении расчетной зависимости коэффициента ослабления нет необходимости в более точных и сложных расчетах электромагнитной силы по нелинейной модели, так как результаты расчетов по линейной модели обладают достаточной точностью в широ-

ком диапазоне изменения МДС и рабочего воздушного зазора. Однако при расчете величины амплитуды вибраций пластин или выходного напряжения необходимо использовать выражение для электромагнитной силы, определяемой с учетом насыщения магнитной цепи.

С использованием полученных расчетных выражений была создана инженерная методика расчета ВЭПСГ, с помощью которой был спроектирован ряд образцов вибрационных преобразователей. Экспериментальные исследования и опытная эксплуатация ряда изготовленных образцов подтвердили адекватность и достоверность математической модели электромагнитных процессов и режима установившихся колебаний ВЭПСГ. Выходные характеристики сигнализатора гололедообразования с помощью полученных выражений (11) и (13) могут быть рассчитаны с достаточной точностью (расхождение опытных и расчетных характеристик не более 15%).

ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ математической модели сигнализатора гололедообразования показывает, что выходные характеристики практически не зависят от параметров контролируемой линии. Это качество совместно с простотой и надежностью конструкции предложенного сигнализатора позволяет надеяться, что данная разработка будет интересной для электросетевых предприятий всех регионов России, где существует опасность образования гололеда на воздушных линиях электропередач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рудакова, Р. М.** Методы борьбы с гололедом в электрических сетях энергосистем : науч.-произв. изд. / Р. М. Рудакова, И. В. Вавилова, И. Е. Голубков. Уфа : УГАТУ, 2005. 187 с.
2. **Хайруллин, И. Х.** Пат. РФ № 2219634. Сигнализатор гололедных отложений / И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, Л. Ш. Вафин, И. Ш. Вафин. Бюл. № 35 от 20.12.2003.
3. **Исмагилов, Ф. Р.** Математическое моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, Р. Р. Саттаров, Л. Ш. Вафин // Вестник УГАТУ. 2004. Т. 5, № 2 (10). С. 99–103.
4. **Дьяконов, В. П.** Компьютерная математика. Теория и практика / В. П. Дьяконов. М. : Нолидж, 2001. 1296 с.
5. **Иванов-Смоленский, А. В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский. М. : Высшая школа, 1989. 312 с.
6. **Писаренко, Г. С.** Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. Киев : Наукова думка, 1988. 736 с.

ОБ АВТОРАХ



Исмагилов Флор Рашидович, проф., зав. каф. электромеханики, проректор УГАТУ. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элем. и устр. управления (УГАТУ, 1998). Тр. в обл. электромех. преобр. энергии.



Саттаров Роберт Радилович, доц. той же каф. Дипл. физик-геофизик (БГУ, 1996). Канд. техн. наук по элементам и системам управления (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. электромех. преобр. энергии.

Вафин Линар Шайхулович, инж. Демск. электр. сетей г. Уфы. Дипл. инж.-электромех. (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. электромех. преобр. энергии.