



УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ КОНТРОЛЕ ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Б. В. КОСТИВ, И. С. КИСИЛЬ

Разработана усовершенствованная методика профилирования, которая может применяться при бесконтактном контроле изоляционного покрытия подземных трубопроводов и позволяющая повысить производительность процесса контроля. Использование методики возможно как для одного, так и для нескольких параллельных трубопроводов. Выполнено математическое моделирование методики. Рассмотрены способы повышения точности получения данных при профилировании.

Developed improved method of profiling for control coating of underground pipelines, which can increase the productivity of the control process. Using techniques as possible for one or multiple pipelines. Done modeling work methods. Consider ways to improve the accuracy of obtaining data for profiling.

Большинство бесконтактных методов контроля изоляционного покрытия подземных металлических трубопроводов, которые основываются на измерении напряженности магнитного поля, требуют точного нахождения оси подземного трубопровода. В таком случае при измерении тратится определенное время, а также возникают погрешности, в которых присутствует и человеческий фактор. Также в подавляющем большинстве случаев без методики профилирования невозможно определить значение токов в стенках нескольких параллельных трубопроводов.

С целью получения более точных результатов определения значения тока в стенке трубопроводов предлагается выполнять профилирование в плоскости, перпендикулярной осям трубопроводов. Полученные данные можно обрабатывать разнообразными численными методами (например, градиентным методом, методом Бокса и др.), которые позволяют определять значение токов в стенках подземных трубопроводов [1]. Для получения этих значений в трубопроводах можно также применять искусственные нейронные сети и методику с использованием условно нормальных уравнений [2, 3].

Значительное количество выходных данных также позволит повысить точность, поскольку будут уменьшены случайные погрешности.

Следует отметить, что определение профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля использовал А. Яворский [4]. Это было реализовано в информационно-измерительной системе БКИТ-2. На практике использование такого метода является достаточно проблематичным, поскольку для реализации необходима

специальная линейка, которая устанавливается над трассой. При размещении такой линейки необходимо придерживаться перпендикулярности к оси трубопроводов, предотвращать ее провисание. При контроле двух и более трубопроводов линейка должна иметь значительную длину. При диагностировании длинной трассы процесс переноса и размещения такой габаритной конструкции занимает много времени.

Предложен метод определения профиля напряженности магнитного поля, который можно использовать для диагностирования изоляционного покрытия как для одного, так и для нескольких параллельных трубопроводов.

Для этого используется система из нескольких горизонтально размещенных магнитных антенн (МА) (рис. 1). Расстояние между антеннами должно быть постоянным и одинаковым. Профилирование с использованием предложенной системы магнитных антенн происходит путем перемещения этой системы параллельно поверхности земли и в плоскости, перпендикулярной оси трубопроводов. В процессе такого перемещения происходит одновременная циклическая запись значений напряжения из трех антенн, по которым опреде-

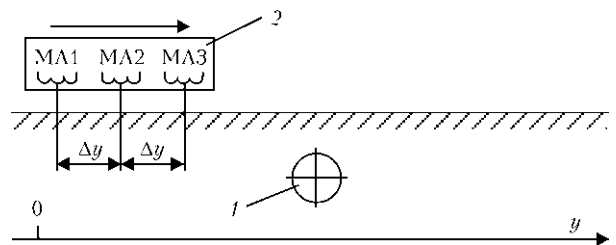


Рис. 1. Метод определения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля над трубопроводом 1 с использованием системы из нескольких горизонтально расположенных антенн 2

ляются горизонтальные составляющие напряженности магнитного поля в точках размещения этих антенн.

Определенной проблемой при таком профилировании является привязка полученных данных к расстоянию, т. е. необходима такая реализация, которая бы позволила записывать кроме значений напряженности еще и расстояние между точками, где происходило измерение.

Для измерения расстояния описанным способом необходимо перемещать систему магнитных антенн МА1—МА3 через оси одного или нескольких параллельных трубопроводов с одновременной записью значений напряжений и их дальнейшего преобразования в значения напряженностей магнитного поля. После выполнения перемещения системы получаем три массива значений напряженности магнитного поля. Значение элементов каждого массива с одинаковым индексом будут отвечать горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля в трех точках, удаленных на расстояние Δy друг от друга в определенный момент времени. Проводя обработку данных и сравнивая полученные массивы, можно получить профиль напряженности магнитного поля над контролируемыми подземными трубопроводами.

На рис. 2 изображен процесс дискретизации профиля напряженности магнитного поля с использованием трех антенн A , B и C , где H_a , H_b , H_c — соответствующие массивы значений горизонтальной составляющей напряженности маг-

нитного поля, полученные оператором при перемещении системы антенн через ось трубопровода.

Алгоритм дискретизации заключается в сравнении полученных массивов данных и нахождения равных значений. Первое измерение будет содержать три значения напряженности, которые и будут первыми тремя точками профиля: $H_1 = H_{a_1}$, $H_2 = H_{b_1}$, $H_3 = H_{c_1}$. Далее в массивах A и B последовательно находят элементы, которые соответственно равны элементам H_{b_1} и H_{c_1} : $H_{b_1} = H_{a_i}$ и $H_{c_1} = H_{b_j}$. Элемент H_{c_i} будет содержать значение следующей точки дискретизованного профиля, т. е. $H_4 = H_{c_i}$. Далее операция поиска повторяется и находятся следующие пары значений $H_{b_i} = H_{a_k}$, $H_{c_i} = H_{b_k}$ и определяется точка $H_5 = H_{c_k}$. Процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто достаточное количество измеренных данных до и после осей одного или нескольких параллельных трубопроводов.

В результате поиска точек по описанному алгоритму получают ряд значений $H_1, H_2, H_3, H_4, \dots$. Они будут соответствовать профилю горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля, которая измерена с шагом Δy .

Минимальное количество антенн для использования описанной методики — две. Применение в нашем случае трех антенн позволяет повысить точность вычислений, поскольку при этом уменьшится влияние на метод помех измеренных значений напряженностей. Использование еще большего количества антенн в алгоритме позволит получить больше исходных массивов, повысить точность, но практическая реализация такой системы усложняется.

Предложенный алгоритм достаточно легко реализуется при наличии значений, измеренных с высокой частотой (более 10 изм./с) и при отсутствии значительных помех. На практике в измеренном сигнале присутствуют помехи и не всегда можно достичь высокой скорости измерений. Пример экспериментально измеренных значений горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля при перемещении предложенной системы магнитных антенн через модель трубопровода приведен на рис. 3.

Обработку полученных таким образом данных можно проводить, выполняя сглаживание и последующую аппроксимацию с целью получения функциональных зависимостей для каждой магнитной антенны.

Проведенные исследования показали, что для данного случая целесообразно использовать сглаживающую сплайновую интерполяцию, поскольку сглаживающий сплайн отличается от интерполяционного тем, что требование прохождения графика сплайна через заданные точки заменяется компромиссом между двумя требованиями:

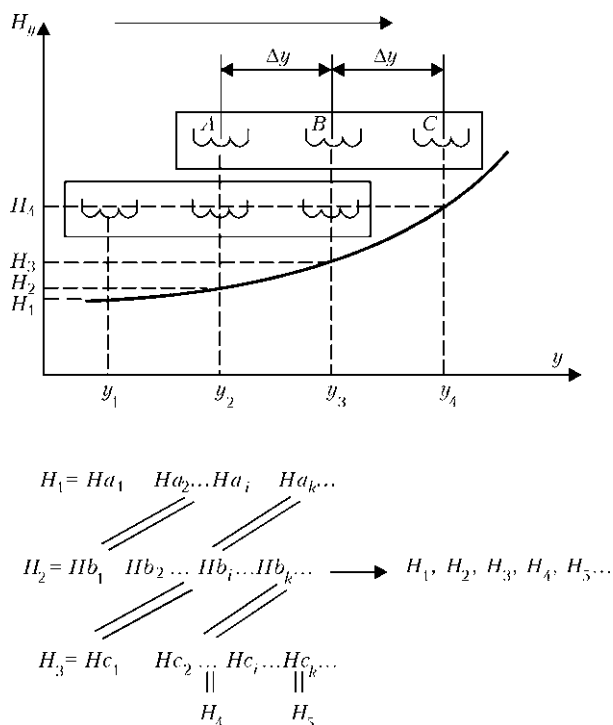


Рис. 2. Проведение измерений и обработка полученных результатов

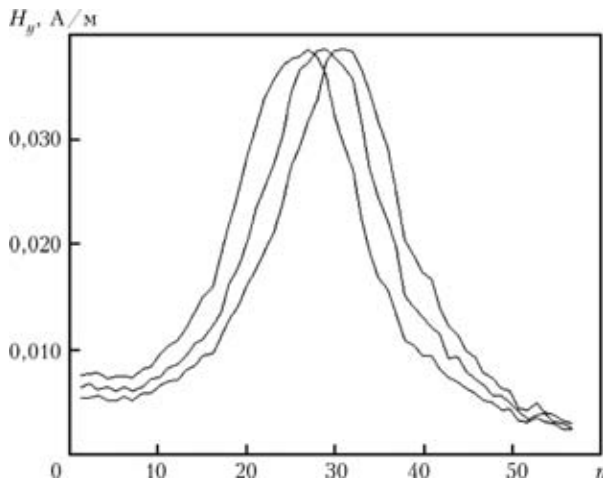


Рис. 3. Напряженность магнитного поля при прохождении через ось трубопровода системы из трех магнитных антенн

график сплайна должен проходить как можно ближе к заданным точкам;

гладкость полученной кривой должна быть как можно большей.

Пусть сглаживающий сплайн записан как $f(x)$, а (x_k, y_k) , $k = 1, 2, \dots, n$ — начальные данные. В качестве меры гладкости сплайна $f(x)$ выбирается интегральная характеристика $F(D^m f)$ [5]:

$$F(D^m f) = \int_{x_1}^{x_n} \lambda(x) |D^m f(x)|^2 dx, \quad (1)$$

где $\lambda(x)$ — положительная весовая функция, обычно константа и равная 1; $D^m f(x)$ — производная m -го порядка от функции $f(x)$; m — число, при котором $2m$ — порядок сплайна.

В качестве сглаживающего сплайна был выбран кубический. Для такого сплайна мерой гладкости является выражение:

$$F(D^2 f) = \int_{x_1}^{x_n} \left(\frac{d^2 f}{dx^2} \right)^2 dx. \quad (2)$$

В качестве меры близости выбирают взвешенное суммарное отклонение сплайна $E(f)$ от начальных данных:

$$E(f) = \sum_{k=1}^n w_k (y_k - f(x_k))^2, \quad (3)$$

где w_k — весовые коэффициенты, которые для равноудаленных точек определяются из зависимостей:

$$w_1 = w_n = h/2, \quad w_k = h, \quad k = 2, 3, \dots, n-1.$$

Дальше можно задаться некоторым параметром ρ , где $0 < \rho < \infty$, и искать такой сглаживающий сплайн, который минимизирует выражение

$$\rho E(f) + F(D^2 f). \quad (4)$$

Другой вариант построения сглаживающего сплайна заключается в выборе параметра ρ и поиска сплайна $f(x)$, который минимизирует такое выражение:

$$\rho E(f) + (1-\rho)F(D^2 f). \quad (5)$$

Здесь параметр ρ изменяется от 0 до 1, причем $\rho = 1$ отвечает обычному кубическому сплайну, а $\rho = 0$ — аппроксимации данных линейной функцией.

В зависимости от количества данных интерполяцию целесообразно проводить с параметром ρ , который находится в пределах $0,0001 \dots 0,1$.

Использование сглаживания интерполяции сплайнами позволяет также находить промежуточные значения между двумя измеренными точками. Это особенно актуально для повышения точности получения профиля напряженности магнитного поля при небольшом количестве измеренных данных.

При выполнении сплайновой интерполяции на концах полученного графика реальные и интерполированные данные часто расходятся. Для исключения этого явления рекомендуется 10...20 % начальных и конечных интерполированных данных не учитывать.

Алгоритм измерения и дискретизации приведен на рис. 4. Он состоит из трех основных частей. Первая отвечает за измерение и запись значений горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля, вторая — за проведение сглаживающей сплайновой интерполяции, третья — за обработку полученных данных и получение конечного массива результатов профилирования.

Первые три точки дискретизованного профиля определяются в начале интервала поиска в точке ind_s и соответственно равны значениям напряженности, полученным с помощью каждой из трех антенн (рис. 4, поз. 3).

Поскольку измеренные данные содержат погрешности, то и при интерполяции практически невозможно получить три идентичных набора данных для трех антенн. Поэтому поиск значений профиля выполняют, не сравнивая пары значений, а ища диапазоны, в которых выполняется условие вхождения данных в разрешенный диапазон. Например, для поиска значения H_4 профиля напряженности (рис. 5) сначала находят нижний индекс i_l , где начинают выполняться условия $Ha_{i_l} > H_2 - \frac{\alpha}{2}H_2$ и $Hb_{i_l} > H_3 - \frac{\alpha}{2}H_3$, а затем определяют верхний индекс i_h , где еще выполняются условия $Ha_{i_h} < H_2 + \frac{\alpha}{2}H_2$ и $Hb_{i_h} < H_3 + \frac{\alpha}{2}H_3$.

Из полученных индексов получают индекс $i = (i_h + i_l)/2$. Последующий поиск происходит аналогично. Таким образом, $H_4 = Hc_i$. Такая ме-

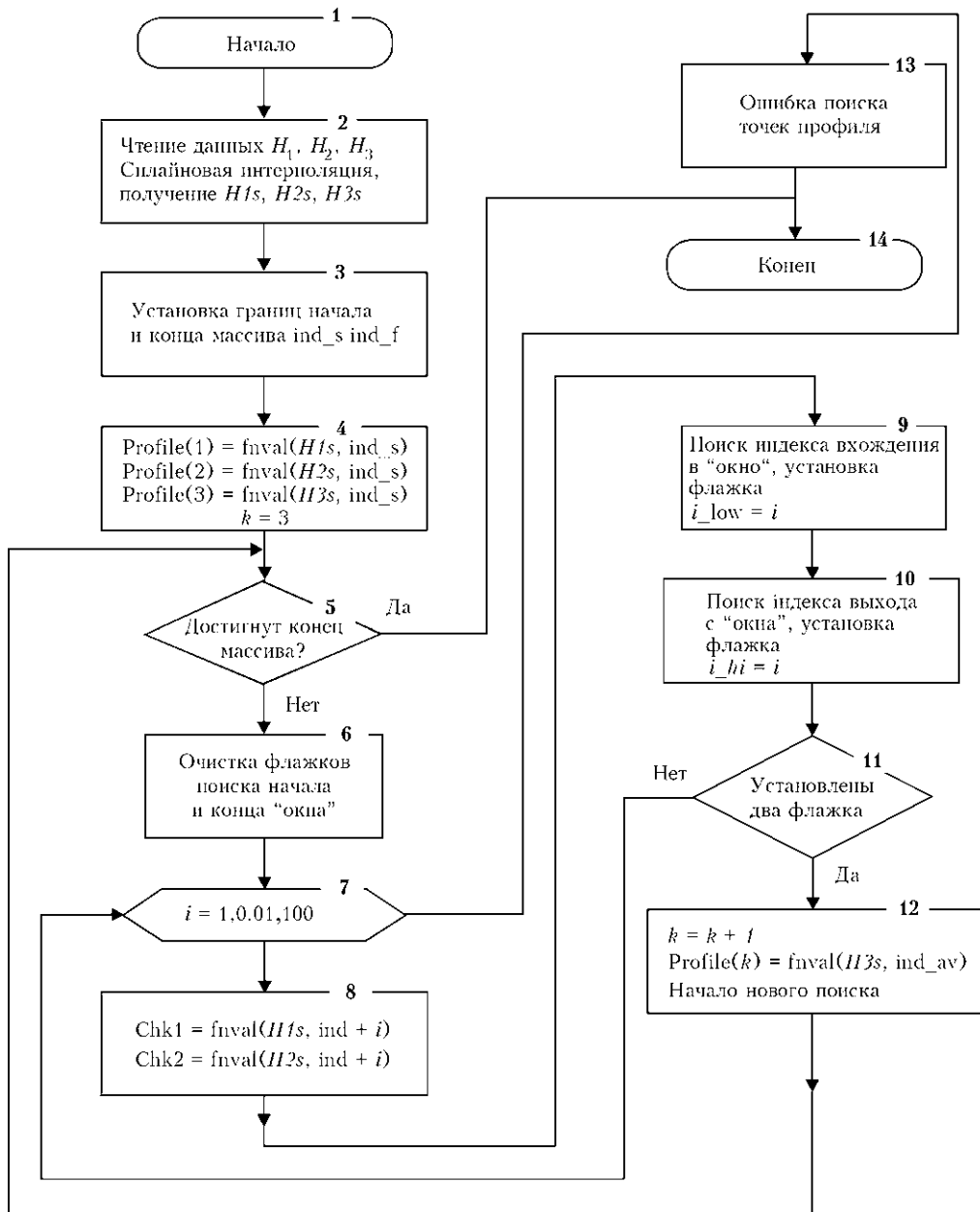


Рис. 4. Алгоритм определения дискретизированного профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля

тодика позволяет точнее находить точки профиля. В алгоритме он изображен на позициях 5–12 (рис. 4).

Использование сглаживающей сплайновой интерполяции позволяет определять промежуточные значения между измеренными данными. В предложенном алгоритме дополнительно вычисляется 100 промежуточных точек между имеющимися измеренными данными (рис. 4, поз. 7, 8).

Алгоритм заканчивает работу по достижению конца имеющихся данных в массиве данных. После этого в массиве *profile* будут содержаться данные, которые отвечают дискретизации профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля с шагом Δy .

Проверка работы предложенного способа фиксации точек, соответствующих приростам Δy , при

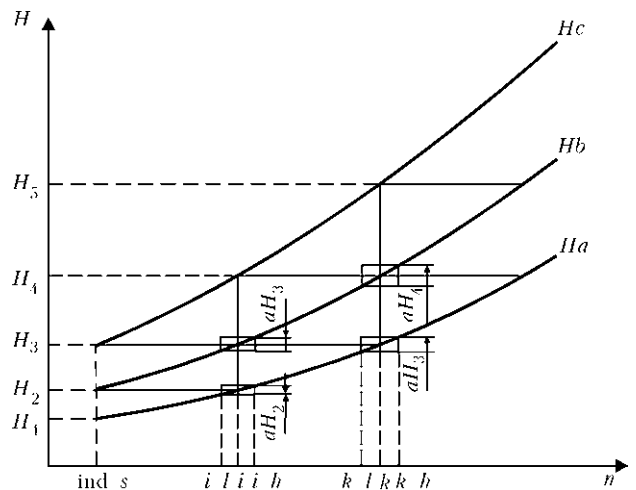


Рис. 5. Определение точек профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля

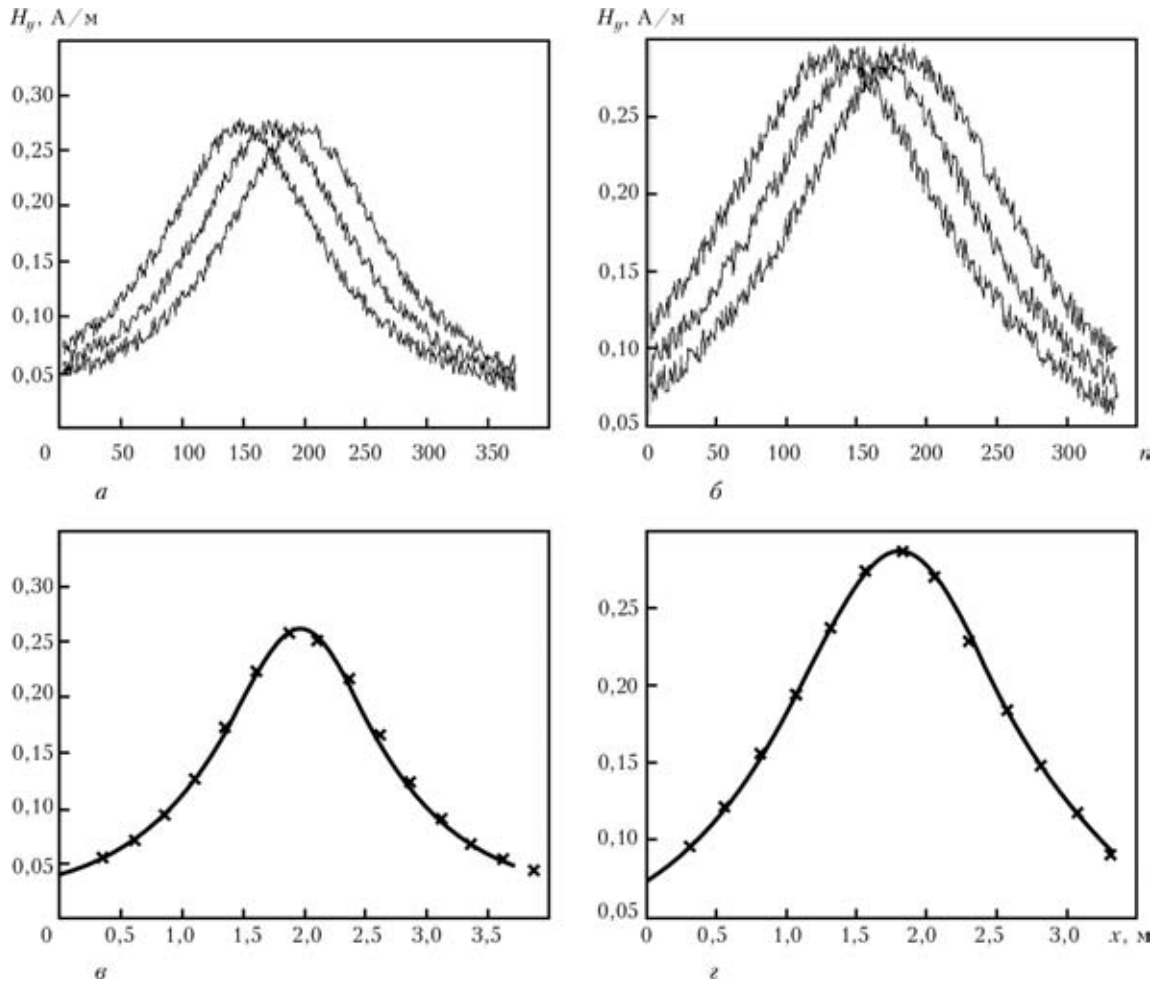


Рис. 6. Примеры работы методики определения профиля напряженности магнитного поля над подземным трубопроводом

наличии помех происходила методами численного моделирования. Для этого задавались случайным образом данные для моделирования (ток в стенке трубопровода, шаг, глубина залегания трубопровода z , расстояние до условного начала координат, уровень помех). Помехи выбирались аддитивные, их уровень составлял до 7 % максимального значения полезного сигнала.

Тип помех выбирали на основе проведенных опытов. При определении напряженности магнитного поля сначала измеряли средний уровень помех, который принимали равным нулю. При измерениях напряженности этот уровень вычитался от измеренного полезного сигнала.

Предложенная методика реализована в среде MATLAB. По результатам численного моделирования установлено, что максимальная относительная погрешность определения напряженности магнитного поля составляет не больше 1,5 %.

Иллюстрация работы методики приведена на рис. 6. Сгенерированные помехой профили (рис. 6, а, б) интерполируют сглаживающим сплайном и получают точки профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля (рис. 6, в, г).

Работа методики была проверена и на реальных данных. На рис. 7 приведен результат расчета профиля по данным, приведенным на рис. 3.

Для предотвращения возникновения погрешностей при использовании предложенной методики необходимо выполнять перемещение блока магнитных антенн в плоскости, перпендикулярной оси трубопроводов. На практике такую ори-

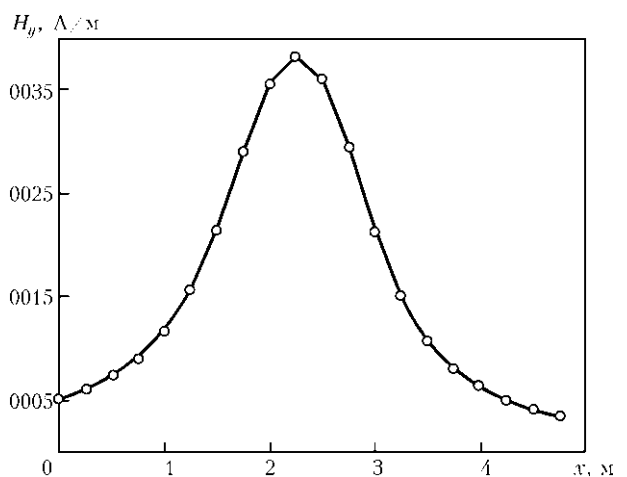


Рис. 7. Пример получения профиля напряженности по реальным данным



ентацию выполняют по минимальным значениям продольной составляющей магнитного поля трубопроводов.

Еще одним источником погрешностей может быть наклон и вертикальное перемещение блока антенн. Для предотвращения возникновения таких погрешностей используется инклинометр и акселерометр. Например, совмещенный инклинометр и акселерометр ADIS16209 позволяет определять угол наклона системы с точностью $0,1^\circ$ и ускорение с точностью $2,4 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2$. Благодаря этому указанный инклинометр/акселерометр позволяет реализовывать сигнализацию отклонения системы и вернуть ее в нужное положение.

1. *Яворський А. В.* Розробка методу та системи для безконтактного контролю стану ізоляції промислових нафтогазопроводів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Івано-

Франківськ: Ів.-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2005. — 22 с.

2. *Костів Б. В., Кісіль І. С., Боднар Р. Т.* Оцінка стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів на основі аналізу профілю напруженості магнітного поля над ними // Методи та прилади контролю якості. — 2007. — № 18. — С. 17–21.
3. *Кісіль І. С., Костів Б. В.* Методика обробки результатів багатократних спостережень напруженості магнітного поля при безконтактному визначенні параметрів підземних нафтогазопроводів // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут» / Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. — Харків: НТУ «ХПІ». — 2009. — № 14. — С. 11–19.
4. *Яворський А. В., Кісіль І. С.* Інформаційно-вимірвальна система БКІТ-2 для безконтактного контролю ізоляції підземних гальванічно з'єднаних паралельних нафтогазопроводів // Нафтова і газова пром-сть. — 2005. — № 2. — С. 42–43.
5. *Pollock D. S. G.* Smoothing with cubic spline. — http://web-space.qmul.ac.uk/dsgpollock/public_html/PAPERS/SPLIN ES.PDF, 2010.

Ів.-Франк. нац. ун-т нафти і газу

Поступила в редакцію
23.02.2010



Новости УО НКТД

+ 7–11 июня 2010 г. в Москве проводится 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю (подробная информация на сайте: www.ecndt2010.ru). Этот форум несомненно будет интересен и полезен для всех специалистов по неразрушающему контролю. Украинскому обществу НКТД для размещения экспозиции выделен выставочный стенд. Приглашаем принять участие в оформлении этого стенда всех заинтересованных лиц. Это хорошая возможность заявить о себе и продемонстрировать свои разработки в теории и практике НК. По традиции УО НКТД организует поездку делегации Украины для участия в работе конференции и приглашает желающих принять в ней участие (тел.: (044) 271-22-49).

+ На заседании бюро правления УО НКТД было принято решение предложить Британскому институту сварки TWI провести общий научно-технический семинар по современным технологиям НК (TOFD, LRUT, UTPA) в рамках 18-й Международной конференции "Современные методы и средства НК и ТД" в Ялте 4–8 октября.

+ На сайте УО НКТД (www.usndt.com.ua, Новости) размещена информация об издании справочника "Неразрушающий контроль в Украине", который будет содержать сведения о ведущих организациях Украины, занимающихся разработкой, применением средств НК и ТД; поставкой соответствующего оборудования; об основных направлениях их работы. УО НКТД приглашает организации Украины, деятельность которых связана с НК, представить свои информационные материалы для публикации в справочнике.

+ Каждый член Общества может предложить для размещения на сайте УО НКТД свою информацию, если она представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся проблемами НК.

