

УДК 531.7

*Д.Л. Нерадовский*

Нерадовский Денис Леонидович родился в 1979 г., окончил в 2002 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры теоретической механики АГТУ. Имеет 1 печатную статью в области строительства и реконструкции зданий.



### **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ЗАГЛУБЛЕННЫХ В ГРУНТ СВАЙ**

Описан способ экспериментального определения длины сваи, основанный на распространении волн напряжений вдоль нее.

*Ключевые слова:* свая, заглубление, акустика, спектральный анализ, преобразование Фурье.

При проведении работ по реконструкции и ремонту зданий и сооружений обычно требуется знать величину заглубления свай в грунт основания. Ввиду давности постройки зданий, необходимые данные проектной документации часто оказываются утраченными. При проведении ремонтных работ, в частности определении несущей способности свайного основания, их требуется восстановить.

Цель статьи – разработать методику экспериментального определения длины свай, заглубленных в грунт, с помощью движущейся звуковой волны на свае заданной длины.

Определение длины свай основано на распространении волн напряжений вдоль них. Волна напряжения, генерируемая ударом (молотком и т. п.), идет вдоль сваи, отражается от границ раздела сред и возвращается обратно. Явление повторяется до тех пор, пока энергия удара не рассеется. Скорость распространения волны зависит от плотности и качества материала сваи, а также от наличия инородных включений.

Длина сваи может быть определена по времени, необходимому для прохождения ударной волны от точки удара до нижнего конца сваи, и времени возврата волны. Это время связано с резонансной частотой сваи. Измерив время отражения или резонансную частоту и скорость волны напряжений, можно рассчитать длину сваи.

Для испытаний необходимо использовать: ударник (молоток); акселерометры для регистрирования отклика сваи; модуль преобразования, состоящий из усилителя, аналого-цифрового преобразователя; персональный компьютер для анализа полученных данных (рис. 1). Индуцированная ударом волна напряжений должна иметь достаточную энергию для прохождения ее до конца сваи и возврата к началу.

В процессе исследований установлено, что непосредственный удар по свае генерирует наиболее подходящую волну напряжений. Скорость распространения волны фиксируют датчики, находящиеся на боковой поверхности свай и расположенные на определенном расстоянии друг от друга. По замерам скорости волны и времени ее отражения рассчитываем длину сваи.

Вид отражения волны от нижнего конца сваи зависит от характеристик граничных сред. В момент прохождения волны напряжения через границу раздела двух сред часть начальной волны отражается от этой границы, вторая проходит дальше. Амплитуда отраженной волны зависит от угла падения на границу раздела и максимальна при значении угла  $90^\circ$ .

Разность акустических сопротивлений сред ( $R$ ) находим по формуле

$$R = Z_1 - Z_2. \quad (1)$$

Здесь  $Z_1, Z_2$  – акустическое сопротивление соответственно первой и второй среды,

$$Z_1 = c_1 \rho_1; \quad Z_2 = c_2 \rho_2,$$

где  $c_1, c_2$  – скорость распространения волны в первом и втором материале;  
 $\rho_1, \rho_2$  – плотность первого и второго материала.

Разность фаз между прямой и отраженной волнами составляет половину периода [2]. Акустические сопротивления грунтов и конструкционных материалов свай приблизительно одинаковы, т. е.  $R > 0$ . Скорость распространения волны напряжений и скорость звука можно считать равными, тогда в качестве датчиков правомерно использовать микрофоны.

При рассмотрении реальных физических процессов приходится иметь дело с функциями, не являющимися периодическими в строгом математическом смысле. Можно отметить две основные причины, по которым реальные колебательные процессы в принципе не могут быть строго периодическими. Первая – это всевозможные случайные процессы, которые воздействуют на колебательную систему совершенно непредсказуемо, «нарушая» ее строгую периодичность. Вторая связана с наличием диссипативных сил, приводящих к затуханию колебаний вследствие потерь энергии. Анализ полученных данных будем проводить с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Пусть после возбуждения ударной волны один из микрофонов записал сигнал, показанный на рис. 2. Применяя БПФ, можем получить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) сигнала – (рис. 3). На АЧХ явно

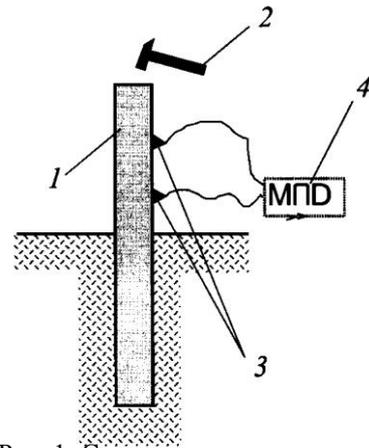


Рис. 1. Схема проведения испытаний: 1 – свая; 2 – молоток; 3 – датчики; 4 – модуль преобразования

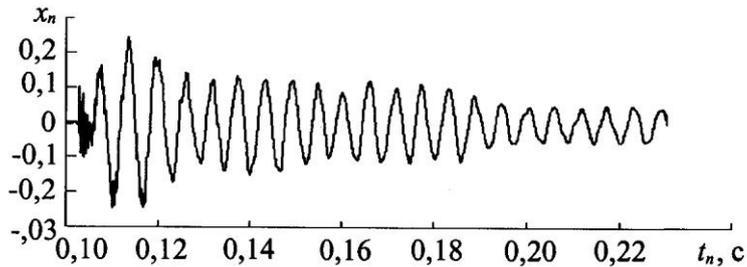


Рис. 2. Полученный сигнал

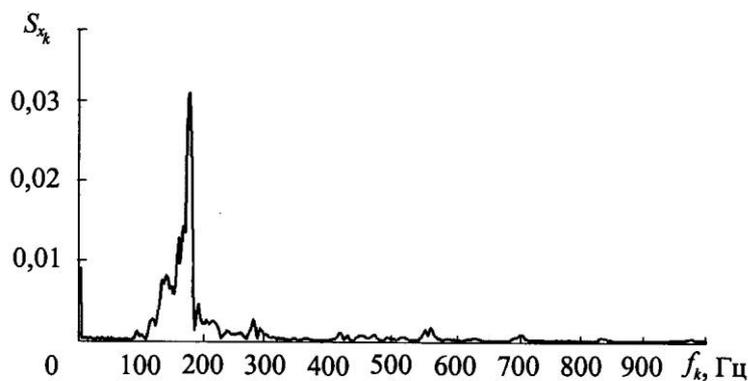


Рис. 3. АЧХ сигнала

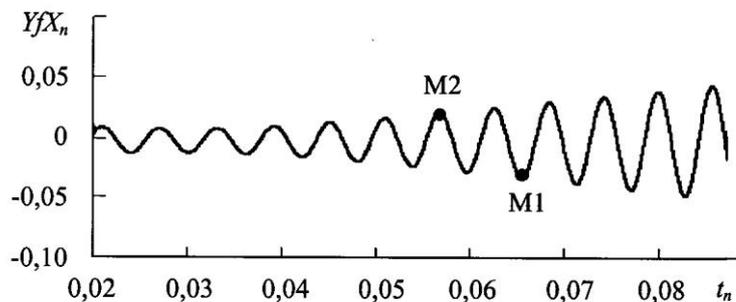


Рис. 4. Сигнал после фильтрации: M1 – прохождение прямой волны; M2 – прохождение отраженной волны

наблюдается амплитудный пик на частоте 175 Гц. Используя полосовой фильтр 170 ... 180 Гц, удалим ненужные составляющие сигнала и произведем обратное преобразование Фурье (рис. 4). Время прохождения волны напряжений вдоль сваи, отражения и возврата можно определить как интервал между двумя точками M1 и M2 на графике.

Точность замера расстояния между датчиками сильно влияет на точность определения скорости волны и все результаты в дальнейшем. Зная скорость распространения волны напряжений и время ее прохождения, можно определить длину сваи по формуле:

$$l = ct, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость распространения волны напряжений;

$t$  – время прохождения волны напряжений вдоль сваи, отражения и возврата.

На основании изложенного можно сформулировать следующие направления работы.

1. Провести эксперимент с забитыми в грунт сваями с целью определить методику проведения замеров, точность метода и накопления статистической информации.

2. Увеличить число датчиков, замеряющих колебания, что позволяет повысить точность измерений, в том числе и скорости волны.

3. Разработать теоретическую базу для определения возможных дефектов в свае, а также их местонахождения.

Основные сведения о рядах Фурье и их преобразованиях приведены в работе [1].

Самостоятельная реализация алгоритмов БПФ представляет собой весьма трудоемкую задачу. Тем не менее практически все современные математические пакеты и научно-инженерные прикладные программы имеют в своем распоряжении встроенные функции, реализующие тот или иной алгоритм БПФ. Пакет Mathcad содержит большой набор подобных функций. Приведем некоторые из них.

$SFFT(y)$  – осуществляет прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) вектора  $y$ . Функция возвращает вектор  $g$ , содержащий столько же элементов, сколько исходный вектор  $y$ .

$ISFFT(g)$  – осуществляет обратное ДПФ вектора  $g$ .

$FFT(y)$  – осуществляет прямое ДПФ вектора  $y$ . Элементы вектора  $y$  должны быть вещественными, а количество элементов  $N$  кратно  $2^m$ . Функция возвращает вектор  $g$ , содержащий  $1 + 2^{m-1}$  элементов.

$IFFT(g)$  – осуществляет обратное ДПФ вектора  $g$ , соответствующее функции FFT.

Примеры использования этих функций рассмотрены ниже.

Спектр сигнала  $y(t)$  определяют как модуль результата прямого дискретного преобразования Фурье в зависимости от частоты  $f_k$ :

$$S(f_k) = |g(f_k)|. \quad (3)$$

Если исследуемый сигнал оказывается вещественным, что наблюдается в большинстве случаев, спектр, определяемый выражением (3), является зеркально симметричным (двухсторонним) относительно центральной точки  $k^* = (N - 1)/2$ , поэтому для его графического изображения и последующего исследования достаточно первых  $(N - 1)/2$  амплитуд (односторонний спектр). На практике часто используют односторонний спектр, амплитуды гармоник которого равны удвоенным амплитудам двухстороннего спектра, кроме амплитуды нулевой гармоники (постоянной составляющей, сохраняющей свое значение). Преимущество одностороннего спектра состоит в том, что в результате нормировки (умножения на 2) его амплитуды совпадают с амплитудами гармонических составляющих самого сигнала.

Спектр мощности представляет собой квадрат АЧХ:

$$SP(f_k) = |g(f_k)|^2. \quad (4)$$

Он имеет размерность спектральной плотности энергии на единицу частоты, а интегрирование в заданном диапазоне частот дает соответствующую мощность. На графике спектра мощности сильнее выделены основные пики, а малые колебания приглушены.

Важными характеристиками частотного анализа являются разрешение по частоте и ширина полосы спектра.

**Разрешение по частоте.** Этот показатель определяет, насколько близко расположенные спектральные составляющие могут быть выделены из исходного сигнала. Частотный шаг спектральных характеристик равен  $1/T$ , где  $T$  – временной интервал реализации сигнала (время наблюдения). Следовательно, разрешение по частоте может быть увеличено при возрастании длительности анализируемого участка сигнала.

**Ширина полосы.** Верхняя граница полосы анализируемого спектра определяется частотой выборки сигнала  $f_s$  и равна  $f_s/2$ , а нижняя граница равна разрешению по частоте  $1/T$ . Частотный диапазон результатов спектрального анализа от  $1/T$  до  $f_s/2$  называется шириной полосы.

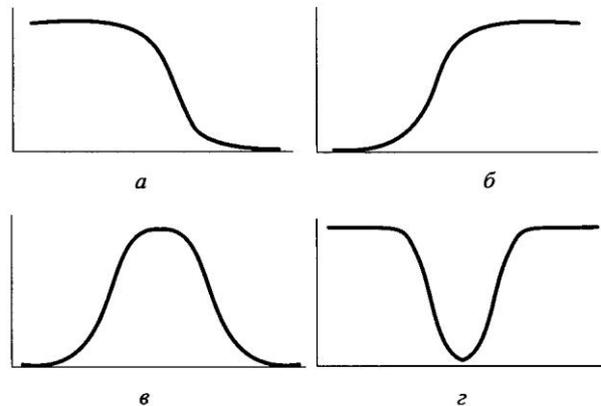
**Элементы цифровой обработки сигналов. Фильтрация сигналов с применением ДПФ (Фурье-фильтрация).** Под фильтрацией подразумевается выделение полезного сигнала из его смеси с мешающим сигналом — шумом. Наиболее распространенный тип фильтрации – частотная. Она состоит в удалении из сигнала спектральных составляющих в заданном диапазоне частот. Если известна область частот, занимаемая полезным сигналом, достаточно выделить ее и подавить области, занятые шумом.

**Фильтры** – это частотно-избирательные устройства, которые пропускают или подавляют сигналы, лежащие в определенных диапазонах (или полосах) частот. Фильтры классифицируются по принципу действия, виду частотной характеристики и ее свойствам. По принципу действия фильтры делят на два класса: аналоговые и цифровые. Аналоговые фильтры конструируют в виде электронных схем с использованием резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, транзисторов, операционных усилителей и других элементов. Работа цифровых фильтров начинается уже после преобразования аналогового сигнала в цифровую форму и обеспечивается вычислительными и программными средствами.

По виду частотной характеристики различают четыре типа фильтров (рис. 5):

- низких частот (ФНЧ), пропускающие нижние частоты и подавляющие верхние;
- верхних частот (ФВЧ), пропускающие верхние частоты и подавляющие нижние;
- полосовые (ПФ), пропускающие определенный частотный диапазон;
- режекторные (РФ), подавляющие колебания в заданном частотном диапазоне.

Рис. 5. Примеры АЧХ различных фильтров: *a* – нижних частот; *b* – верхних частот; *в* – полосовой; *г* – режекторный



Фурье-фильтрация. Использование преобразований Фурье позволяет не только получать информацию о спектре сигнала, но также осуществлять синтез сигнала по заданному спектру. Это открывает огромные возможности для компьютерной (цифровой) обработки сигналов, в частности для их фильтрации. Метод Фурье-фильтрации заключается в следующем: сначала посредством прямого преобразования Фурье вычисляют спектр сигнала, затем из него удаляют ненужные частотные составляющие, после чего осуществляют синтез сигнала применением обратного преобразования Фурье.

Роль фильтров в этом случае могут играть различные математические функции, графики которых имеют вид, аналогичный АЧХ обычных аналоговых фильтров, либо ступенчатые функции, обеспечивающие практически бесконечную крутизну среза.

Пример спектрального анализа и Фурье-фильтрации сигнала с помощью функций FFT и IFFT. Ниже представлен документ Mathcad, иллюстрирующий определение АЧХ спектра сигнала на основе дискретного преобразования Фурье.

Сгенерируем зашумленный сигнал, состоящий из трех составляющих: полезные составляющие сигнала:

$$Y_n := A \sin(\pi f_2 t_n) e^{-\gamma_2 t_n};$$

$$X_n := A \sin(\pi f_1 t_n) e^{-\gamma_1 t_n};$$

паразитная составляющая сигнала (шум):

$$P_n := 4 \cos(\text{rnd}(n)).$$

В этих формулах

$$t_n := n \frac{T}{N-1},$$

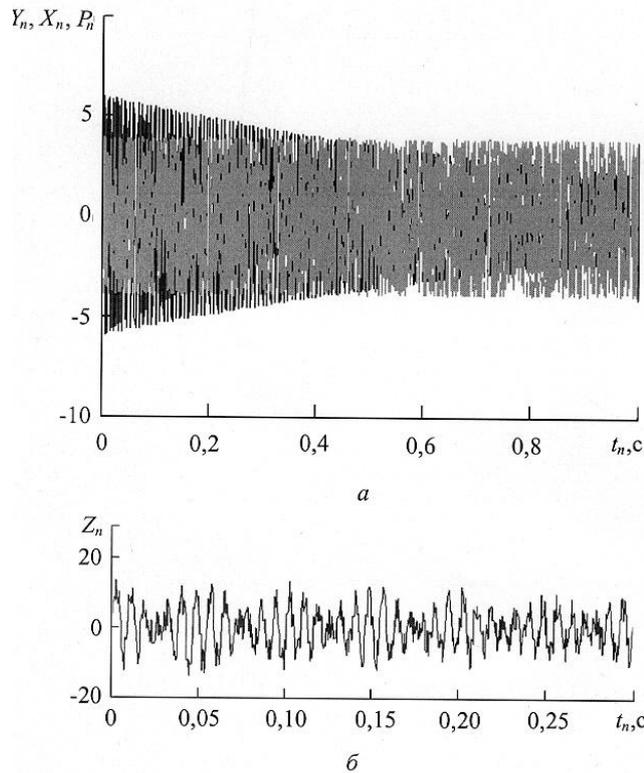


Рис. 6. Составляющие генерируемого сигнала (а) и сгенерированный сигнал (б)

$n: = 0, \dots, N-1;$

$N$  – число точек,  $N : = 4096;$

$T$  – временное окно,  $T : = 2;$

$f$  – собственная частота,  $f_1 : = 130; f_2 : = 110;$

$\gamma$  – коэффициенты затухания,  $\gamma_1 : = 1; \gamma_2 : = 3;$

$A$  – начальная амплитуда,  $A : = 6;$

$rnd(x)$  – функция Mathcad случайных чисел.

На рис. 6, а представлены фрагменты сигналов, составляющие зашумленный сигнал  $Z = X + Y + P$ , на рис 6, б – сумма трех составляющих.

Прямое преобразование Фурье:  $g = FFT(Z)$ ; амплитудный спектр:  $S = 2|g|$ ; шкала частот (Гц):  $k = 0, \dots, last(g)$ ;  $f_k = \frac{k}{T}$ .

На рис. 7 показана АЧХ зашумленного сигнала. Здесь отчетливо видны два пика на частотах 110 и 130 Гц. Кроме этого, на всем частотном диапазоне наблюдаются небольшие хаотические всплески.

Дальнейшее продолжение документа Mathcad иллюстрирует фильтрацию сигнала методом Фурье-фильтрации. Для этого используют двойной полосовой фильтр (рис. 8) с полосами пропускания 108 ... 112 и

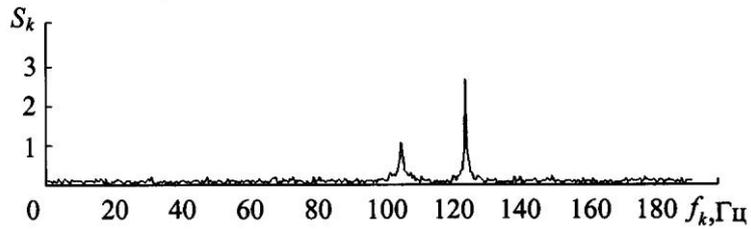


Рис. 7. АЧХ спектра

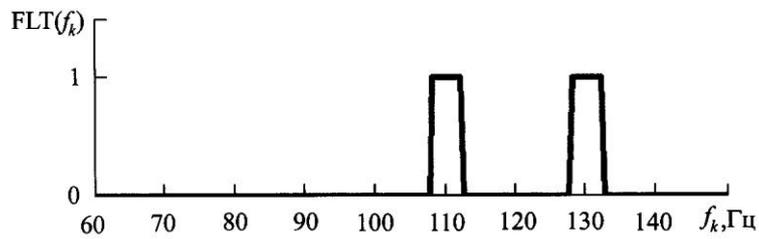


Рис. 8. АЧХ полосового фильтра

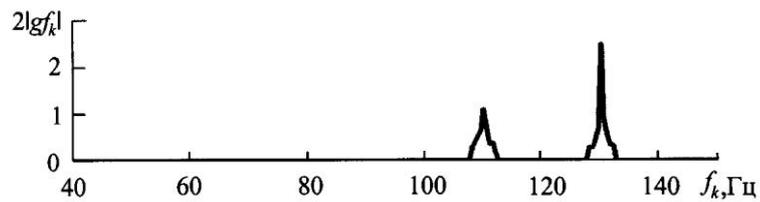


Рис. 9. АЧХ сигнала после фильтрации

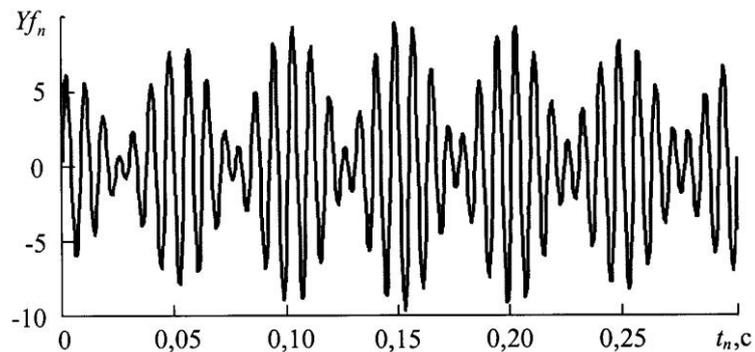


Рис. 10. Сигнал после фильтрации (фрагмент)

128 ... 132 Гц, описанный в виде ступенчатой функции  $FLT(f)$  при помощи встроенной функции Mathcad «if». Удаление из спектра ненужных составляющих осуществляют умножением рассчитанного спектра на функцию  $FLT(f)$ . Удаление из спектра ненужных составляющих осуществляют умножением рассчитанного спектра на функцию  $FLT(f)$ .

Для этого зададим АЧХ полосового фильтра:

$$\text{FLT}(f) := \text{if}(128 \leq f \leq 132, 1, 0) + \text{if}(108 \leq f \leq 112, 1, 0).$$

Удаляем из спектра ненужные составляющие (рис. 9):

$$gf_k := g_k \text{FLT}(f_k).$$

Обратное преобразование Фурье (синтез сигнала (рис. 10)):

$$Yf := \text{IFFT}(gf).$$

Использование АЧХ сигнала, полученной дискретным преобразованием Фурье с последующим выделением резонансных частот и обратным преобразованием Фурье, позволяет эффективно отделять (отфильтровать) полезный сигнал от паразитных «шумов».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев, Е.Н.* Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам [Текст] / Е.Н. Васильев, И.П. Гуров. – СПб.: БХВ – С.-Петербург, 1998. – 280 с.
2. *Детлаф, А.А.* Справочник по физике [Текст] / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Наука, 1964. – 848 с.

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 09.03.05

*D.L. Neradovsky*

#### **Technique for Experimental Determination of Soil-Buried Piles Length**

Method of experimental determination of pile length based on stress wave transmission along it is described.

