

ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ СВАЙ В ПРОЦЕССЕ ЗАБИВКИ

Разработаны методы и аппаратура для измерения параметров движения свай в процессе забивки, основанные на акселерометрическом принципе, но в специфическом исполнении и алгоритмическом обеспечении. Показано, что из-за экстремально больших ударных перегрузок и вибраций, а также по экономическим соображениям для решения данной задачи невозможно использовать традиционные акселерометры и инерциальные методы. Описаны конструкция разработанного измерителя и методика съема и обработки информации, позволившие достичь положительных результатов. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие рациональность выбранного направления решения задачи.

Введение

Свайные фундаменты широко используются для сооружений различного назначения как на суше, так и на море (рис. 1). В случае слабых грунтов осуществляют последовательную забивку свай (стандартная длина около 14 м), наращивая и соединяя их в одну колонну с помощью сварки.



Рис. 1. Установка свай на суше и на море

Процесс прекращают при касании составной сваей жесткого основания в грунте или высокого суммарного сопротивления грунта по всей длине сваи. Глубина забивки свай при этом может достигать 50–150 м [1]. При работе сваебойной машины оператор должен иметь информацию о конечных перемещениях свайной колонны после каждого удара. Эти перемещения в зависимости от

Коновалов Сергей Феодосьевич. Доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Действительный член Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Подчезерцев Виктор Павлович. Кандидат технических наук, доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Статья по докладу на XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

реологии грунта при единичном ударе могут варьироваться от нескольких метров на начальной стадии до 0.1 мм – на конечной. Полученная информация используется для выбора оптимального с точки зрения энергозатрат режима забивки, регулируемого величиной подъема молота. Особенно важно иметь такую информацию на конечном этапе забивки для предотвращения возможного разрушения сваи или разрушения скального выступа (рис. 2), которого достигла колонна.

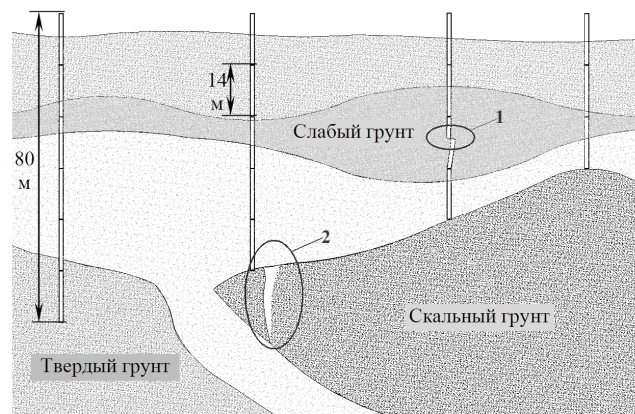


Рис. 2. Различные варианты установки свай в грунте:
1 – повреждение сваи, 2 – повреждение скального грунта

Масса молота у современных гидравлических сваебойных систем может достигать до 20 т, а высота его подъема на конечных этапах забивки – до 1.5 м [2]. Таким образом, вероятность повреждения сваи весьма реальна, что совершенно недопустимо согласно действующим строительным нормам, и ведет к большим экономическим потерям (штрафы со стороны строительной организации). Для предотвращения поломки процесс забивки прекращают, когда конечное перемещение свайной колонны после 10 последовательных ударов молота не превышает 1 мм. При этом следует иметь в виду, что после удара из-за упругих деформаций сваи и грунта ее верхний конец совершает колебательное движение с амплитудой до 10 см. Наиболее простой и чаще всего используемый в настоящее время метод измерения перемещений реализуется помощником оператора сваебойной машины. Помощник, находясь в непосредственной близости от сваи, наклеивает на нее лист миллиметровой бумаги и прикладывает к ней массивную кривую линейку, охватывающую по дуге $<90^\circ$ наружную поверхность сваи. Далее в процессе забивки он удерживает линейку и медленно проводит вдоль нее по миллиметровке карандашом. Линейка в силу инерции сохраняет свое положение при резких перемещениях сваи, и след карандаша на бумаге соответствует перемещению сваи (рис. 3).

Если при 10 последовательных ударах молота конечное перемещение сваи не превышает 1 мм, то процесс забивки прекращают. Этот метод, несмотря на свою простоту, имеет очевидные недостатки, связанные прежде всего с требованиями техники безопасности, а также зачастую с невозможностью проводить замеры в непосредственной близости от сваи для заболоченных и водных сред.

По соображениям, обозначенным в аннотации, единственно приемлемым в данном случае является инерциальный метод, обладающий автономностью и независимостью от условий внешней среды. Разработчики и изготовители молотов для забивки свай уже длительное время стремились оснастить свои уста-

новки акселерометрическими датчиками, однако при попытках реализации инерциального метода, основанного на измерении и двукратном интегрировании ускорения, их встречали следующие серьезные трудности.

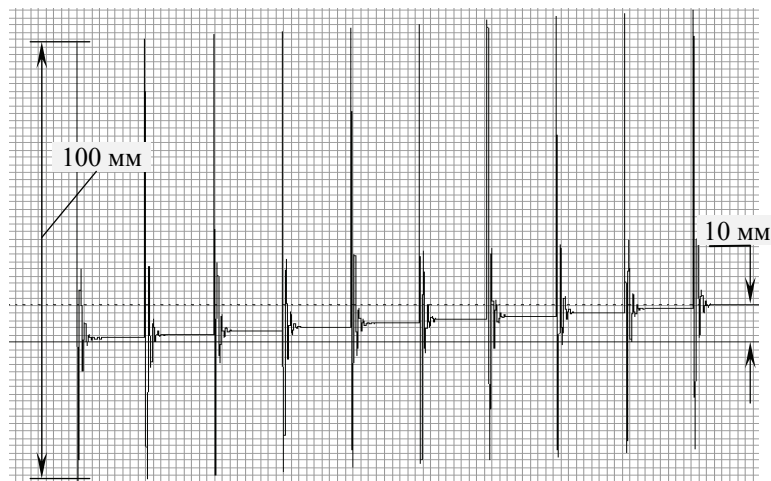


Рис. 3. График движения сваи при 10 последовательных ударах

1. Амплитуда ударного ускорения при забивке свай достигает 3000 g, поэтому при измерении перемещения сваи методом интегрирования ускорения акселерометр должен иметь диапазон измеряемого ускорения не менее этой величины и не должен разрушаться от систематического воздействия нескольких миллионов ударных циклов такой интенсивности.

2. Вибрационные возмущения, сопровождающие забивку свай, имеют амплитуду до 1000 g в широком частотном диапазоне. Прибор должен выдерживать указанные вибрационные воздействия и, более того, обеспечивать при этом требуемую точность измерения перемещений.

3. Импульсы ударного воздействия весьма короткие (< 3 мс), и, таким образом, акселерометр с рабочим диапазоном 3000 g должен быть еще и высокочастотным. Требуемая точность измерения перемещения на конечном участке забивки сваи (после 10 ударов) составляет $\Delta S = 0.1$ мм. Оценивая допустимую при 10 последовательных ударах с продолжительностью удара $\Delta t = 0.003$ с погрешность измерения ускорения, получаем $\Delta a = 2 \times \Delta S / (10 \times \Delta t^2) = 2.2$ м/с². Для такой погрешности при измерении ускорения 3000 g необходим акселерометр с нелинейностью выходной характеристики $100 \times 2.2 / (3000 \times 9.8) = 0.0075\%$. При этом для измерения перемещения при импульсном воздействии требуется акселерометр с широкой полосой пропускания, т.е. по своим характеристикам акселерометр должен иметь точность, сравнимую с точностью акселерометра навигационного класса.

4. Стоимость акселерометра не должна превышать \$500.

Очевидно, что приведенным требованиям не отвечает ни один из существующих акселерометров, и вряд ли следует рассчитывать на появление таких приборов в ближайшие годы, даже с учетом стремительного совершенствования МЭМС-технологий.

Метод и алгоритм решения задачи

Вместе с тем при решении задачи измерения перемещения сваи инерциальным методом имеется ряд обстоятельств, упрощающих решение задачи.

1. Необходимо осуществлять измерения конечного перемещения сваи по завершении ударного воздействия. Действительное движение сваи в процессе ее ударного взаимодействия с молотом оператора не интересует.

2. Взаимодействие сваи с молотом имеет прерывистый характер. За время паузы (время подъема молота для следующего удара составляет не менее 1 с) все переходные режимы движения взаимодействующих при ударе элементов завершаются.

3. Конечные перемещения сваи и перемещения опирающегося на наголовник сваи корпуса молота одинаковы (рис. 4). Движение корпуса молота происходит с меньшими ударными ускорениями, поэтому целесообразно инерционным методом измерять конечные перемещения корпуса молота, а не самой сваи.

Эти обстоятельства позволяют подойти к решению задачи измерения ударных перемещений сваи нестандартным методом, используя для измерения простейшую низкочастотную электромеханическую систему, чувствительный элемент которой представляет собой демпфированную массу, подвешенную на пружине с небольшой жесткостью. Перемещение массы фиксируется потенциометром.

Указанный прибор по своим точностным и динамическим характеристикам совершенно не пригоден для реализации обычного инерциального метода, основанного на измерении ускорений с последующим их двукратным интегрированием, а отвечает указанным выше требованиям только по ударо- и вибропрочности и стоимости. Поэтому был предложен метод измерения, в котором интегрирование осуществляется самим чувствительным элементом.

На рис. 4 представлена схема основных элементов гидравлического молота для забивки свай, корпус которого в рабочем положении опирается под собственным весом на наголовник сваи.

На корпусе молота жестко фиксируется инерциальный измеритель перемещений. В торцевых частях бетонной сваи заармированы стальные шайбы для исключения повреждений и обеспечения надежного и герметичного соединения сваркой с последующими стальными шайбами составной сваи.

Амортизаторы, показанные на рис. 4, также служат для защиты сваи от ударных воздействий со стороны молота. Наголовник сваи служит для захвата сваи и взаимной ориентации её и корпуса молота.

В процессе забивки наголовник всегда находится в контакте с верхней частью сваи и в своем движении точно повторяет все ее перемещения. Корпус молота до удара лежит на наголовнике сваи, а после удара и вызванным им

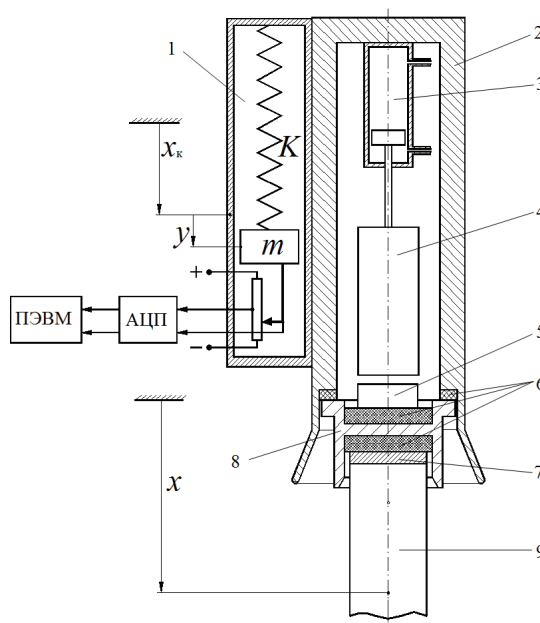


Рис. 4. Схема инерциального измерителя:
1 – инерциальный измеритель, 2 – корпус молота,
3 – гидроцилиндр, 4 – молот, 5 – стальная накладка,
6 – амортизаторы, 7 – стальная шайба,
8 – наголовник, 9 – свая

резким перемещением сваи вниз совершает свободное падение до следующего контакта с наголовником.

Рассмотрим алгоритм предложенного метода измерения перемещения сваи на основе инерциального измерителя (см. рис. 4).

Для математического описания уравнений движения чувствительного элемента измерителя перемещений введем следующие обозначения: m – масса чувствительного элемента (ЧЭ), D – коэффициент демпфирования ЧЭ, K – жесткость пружины, $x(t)$ – перемещение сваи, $x_k(t)$ – перемещение корпуса молота, $y(t)$ – перемещение ЧЭ относительно корпуса прибора (и корпуса молота).

Уравнения движения ЧЭ имеют вид

$$m(\ddot{y}(t) + \ddot{x}_k(t)) + D \cdot \dot{y}(t) + K \cdot y(t) = 0. \quad (1)$$

Откуда

$$\ddot{x}_k(t) = -\ddot{y}(t) - d \cdot \dot{y}(t) - k \cdot y(t), \quad (2)$$

где $d = \frac{D}{m}$, $k = \frac{K}{m}$.

Дважды интегрируя уравнение (2) за время цикла T работы молота (удар + пауза) и учитывая, что за время паузы между ударами движение груза полностью затухает, т.е. $y(0)=0$, $\dot{y}(0)=0$, получаем

$$x_k(T) = -y(T) - d \cdot \int_0^T y(\tau) d\tau - k \cdot \int_0^T \left(\int_0^\tau y(v) dv \right) d\tau. \quad (3)$$

Учитывая, что по окончании удара корпус молота и свая имеют одинаковые результирующие перемещения, т.е. $x_k(t) = x(t)$, в силу их непосредственного контакта до и после удара, а также совпадения начальной и конечной координат чувствительного элемента: $y(T) = y(0) = 0$, окончательно перемещение сваи после удара будет

$$x(T) = -d \cdot \int_0^T y(\tau) d\tau - k \cdot \int_0^T \left(\int_0^\tau y(v) dv \right) d\tau. \quad (4)$$

Таким образом, на основании получаемой с потенциометра информации о перемещении инерционной массы относительно корпуса ($y(t) = \frac{U_{\text{вых}}(t) - U_0}{K_d}$,

где K_d – крутизна датчика перемещения, U_0 – начальное напряжение, соответствующее установившемуся положению ЧЭ) можно рассчитать действительное перемещение сваи за один такт работы молота $T \approx 1$ с. Коэффициенты d и k определяются экспериментально при калибровке измерителя. Значение U_0 может не оставаться стабильным в процессе эксплуатации прибора, например из-за наличия механического гистерезиса в материале пружины, теплового дрейфа и т.п., однако это не будет приводить к заметным погрешностям измерения, если в формуле (4) использовать измеренное в период паузы между ударами установившееся значение U_0 в конце предыдущего такта T работы молота. Получим алгоритм расчета перемещения сваи

$$x = -d \cdot J_n - k \sum_{i=0}^{i=n} \frac{1}{2} (J_{i-1} + J_i) \tau. \quad (6)$$

где $J_i = \frac{1}{K_d} \sum_{j=1}^{j=i} \frac{1}{2} (U_{\text{вых}}((j-1)\tau) + U_{\text{вых}}(j\tau) - 2U_0) \tau$, $n = \frac{T}{\tau}$; τ – период считывания информации с измерителя.

На рис. 5 показана конструкция прибора и его элементов, в таблице даны его параметры.



Рис. 5. Конструкция прибора

Параметры инерциального измерителя

Параметр	Значение
Масса чувствительного элемента	0,224 кг
Жесткость пружины	25 Н/м
Собственная частота недемпфированных колебаний	10,5 с ⁻¹
Длина потенциометра	250 мм
Суммарный коэффициент относительного демпфирования	0,78

В приборе использованы две коаксиальные пружины с встречной намоткой для предотвращения кручения ЧЭ при растяжении – сжатии пружины. Жесткость пружины выби-

ралась из условия обеспечения собственной частоты ≈ 2 Гц, что при коэффициенте относительного затухания $\approx 0,8$ гарантировало затухание колебаний чувствительной массы до конца ударного цикла гидравлического молота, частота которого составляла 1 Гц. Трубка потенциометра пропущена в отверстие в ЧЭ. Константовый провод потенциометра толщиной 0,05 мм обеспечивает при типовом перемещении груза от удара (~ 50 мм) достаточно хорошее разрешение.

Скользящие контакты потенциометра выполнены из сплава ПЛИ-10 диаметром 0,2 мм и для обеспечения надежного контакта состоят из трех «мухолапок» разной длины, что исключает возможность одновременного резонанса при ударе. Для регулировки коэффициента демпфирования используется капиллярное отверстие с регулируемой иглой.

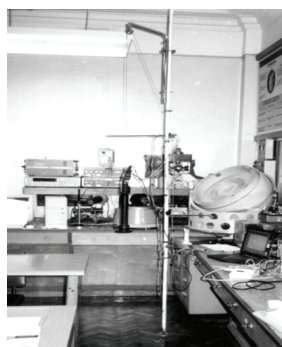


Рис. 6. Испытательный стенд

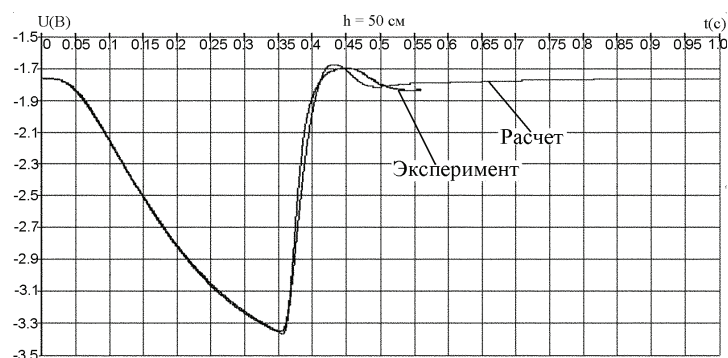


Рис. 7. Изменение выходного сигнала при калибровке

На рис. 6 – экспериментальная установка для определения параметров прибора. При экспериментах прибор совершал свободное падение с различных высот на амортизирующий коврик и по перемещению чувствительного элемента в процессе этих испытаний определялись параметры его математической модели.

График выходного сигнала прибора 1 и его расчетного эквивалента при высоте падения 50 см показан на рис. 7.



Рис. 8. Монтаж инерциального измерителя

На рис. 8 – монтаж прибора на корпусе макета. Экспериментальная проверка системы измерения перемещения свай проводилась в Республике Корея совместно со специалистами южнокорейской компании Dong Kwang Heavy Industrial [3], производящей гидравлические молоты для свайбейных машин.

На рис. 9 показаны законы движения свай, корпуса молота, чувствительного элемента прибора и расчет перемещения свай, полученного рассматриваемым методом. Результаты имеют место при относительно больших перемещениях свай в процессе удара (свыше десятков единиц сантиметров на удар). При работе системы на конечных этапах забивки, когда заглубление практически отсутствует, а после удара наблюдаются резкие отскоки верхнего конца свай, вызванные упругой деформацией грунта и самой свай, характер движения корпуса молота и чувствительного элемента изменяются. Встречные соударения корпуса молота и отскакивающей свай вызывают перемещения чувствительного элемента и, соответственно, газа в зазоре между чувствительным элементом и корпусом с большой скоростью, при которой движение газа перестает быть ламинарным, что приводит к изменению коэффициента демпфирования в приборе, который уже нельзя считать постоянным на протяжении каждого ударного цикла.

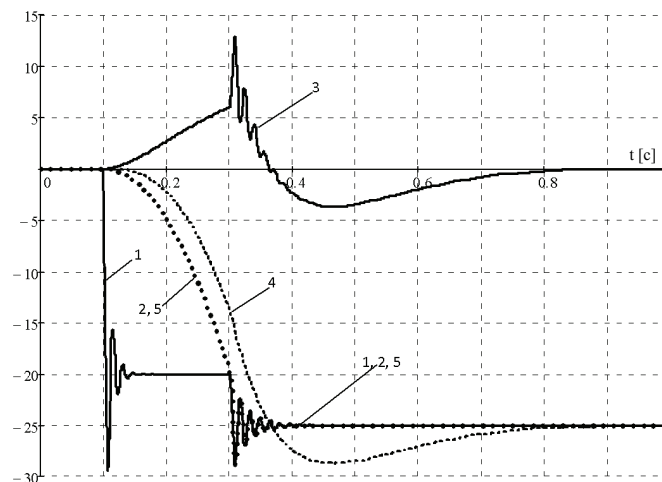


Рис. 9. Перемещения свай (1), корпуса молота (2), чувствительной массы измерителя относительно корпуса (3), измеряемой потенциометром в виде напряжения $U_{\text{вых}}$; чувствительной массы измерителя относительно земли (4), расчетное значение перемещения свай (5)

При расчетах в этом случае рассматривалась модель демпфера, в которой коэффициент демпфирования нелинейно зависит от скорости движения [4]. Коэффициенты этой уточненной модели определялись экспериментально по результатам пробных забивок свай.

На рис. 10 показаны сравнительные результаты замеров конечных перемещений свай, полученные с помощью предложенного метода и с помощью лазерной дальномерной установки. Здесь же приведены графики выходных сигнала

лов чувствительного элемента системы инерциального измерения, соответствующие его положению относительно корпуса измерителя, из которых видно, что колебания подвижной системы измерителя затухают до начала следующего цикла ударного воздействия молота с частотой, не превышающей 1 Гц. По результатам обработки этого выходного сигнала, с помощью предложенного авторами алгоритма рассчитывается действительное перемещение сваи, график которого представлен на этом же рисунке.

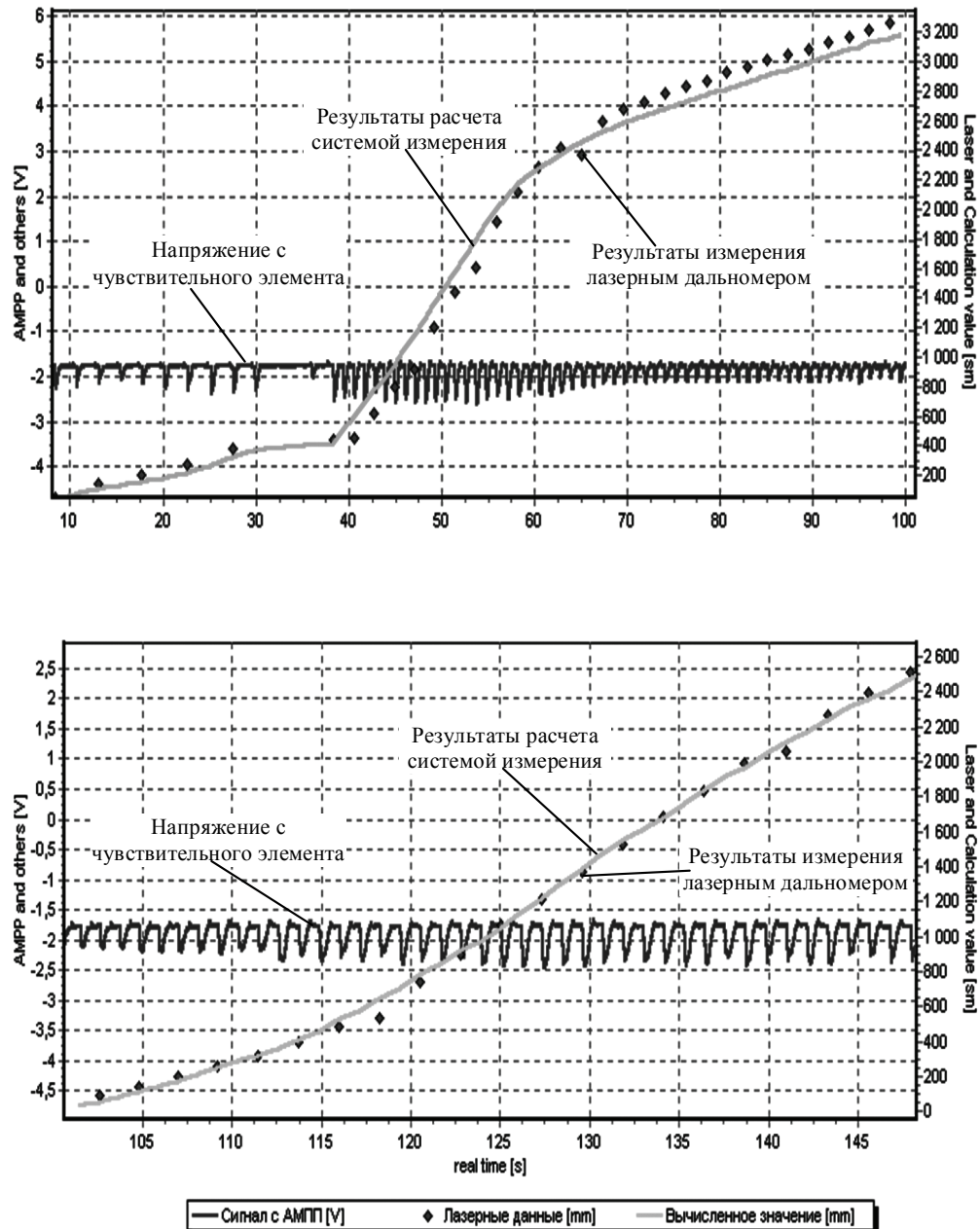


Рис. 10. Сравнительные испытания инерциального измерителя и лазерного дальномера

На рис. 11 представлена структурная схема инерциальной системы измерения перемещения свай при забивке.

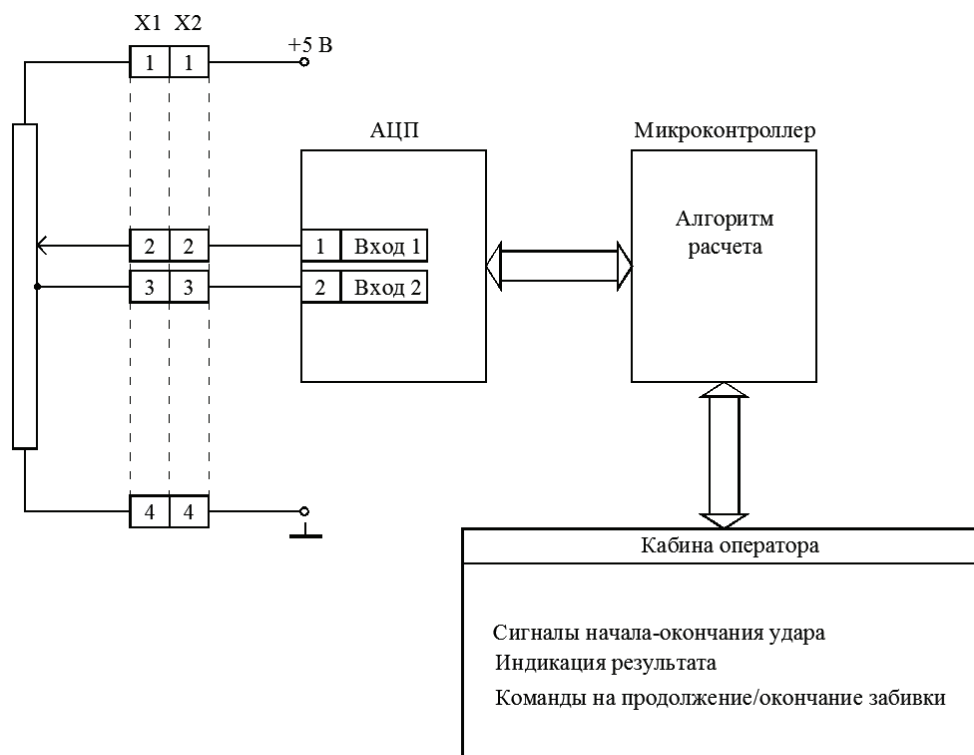


Рис. 11. Структурная схема инерциальной измерительной системы

Выводы

Разработан инерциальный метод измерения конечных перемещений свай с помощью прибора, характеристики которого существенно отличаются от точностных и динамических характеристик традиционных инерциальных чувствительных элементов.

Разработаны конструкция инерциального измерителя перемещения свай, электронные модули и соответствующее программное обеспечение.

Испытания разработанной системы инерциального измерения перемещения свай в процессе ее забивки и соответствующего математического обеспечения показали ее работоспособность в полевых условиях и точность, достаточную для практического применения.

Предложенный метод измерения конечных перемещений тел при импульсных воздействиях может быть с успехом применен при решении задач, далеких от строительных, например при анализе движения спутников под действием ударных импульсов коррекционных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белецкий Б.Ф.** Строительные машины и оборудование: Справочное пособие / Б. Ф. Белецкий, И. Г. Булгакова.- Ростов-на-Дону: Феникс, 2005.- 608 с.
2. **Добронравов С.С.** Строительные машины и основы автоматизации / С.С.Добронравов, В.Г.Дронов.- М: Высш. школа, 2001.- 575 с.

3. **Dong Kwang.** Heavy Industrial Co., Ltd, www.pilemer.com / www.dkh.co.kr.

4. **Ландау Л.Д.** Гидродинамика / Л.Д.Ландау, В.М.Лившиц.- М.: Наука, 1988. - 736 с.

Abstract. In the world practice, mass application of pile foundations for various constructions on the ground surface and in the water environment requires prediction of their reliability. This is reached by defining the value of driving pile penetration to diagnose a ground resistance influencing on the construction stability in the process of exploitation. Various methods used in practice have essential drawbacks concerned, first of all, with the safety requirements. Frequently, boggy and water environments make observation near the pile impossible, and inevitable significant concussions of the base (up to 3000g) on which devices are set influence on the their indications while driving.

In this work an autonomous measuring device for moving pile, a design of a sensitive element, a technique for reading information from a mobile part of this device are offered. A technique for information processing and transfer to the operator's cabin of hydraulic hammer is developed as well. Field tests of measuring system, using Dong Kwang Heavy Industrial Co. Ltd hydraulic hammers for driving piles in the Republic of Korea, gave the opportunity to specify the mathematical model factors of measuring device under real operation conditions and have a measurement error of pile penetration at the final stage not exceeding 0.1 mm. With elastic movements of foundation and a pile being 5-50 cm, it is rather good result, taking into account shocks and vibrations, while driving.

Key words: inertial measuring instrument, ground rheology, piling, shock influences, hydraulic hammer, the monitoring system