

# Модель движения источника вибрационного возмущения системы азимутальной коррекции инклинометра

В. Е. Чулков<sup>1</sup>, С. Ф. Коновалов, Д. В. Майоров, П. Г. Русанов, Ю. А. Пономарёв

МГТУ им. Н.Э. Баумана

<sup>1</sup>vitaliy.chulkov@gmail.com

**Аннотация.** Работа содержит описание системы азимутальной коррекции инклинометра, выступающей в качестве альтернативной системы определения азимута в высоких широтах Земли, описания основных функциональных блоков, реализующих способ определения азимута, конструкцию источника вибрационного возмущения и блока приемника вибрационных колебаний. В работе приводится подход к разработке модели движения вала в источнике вибрационного возмущения, с помощью которого проведено моделирование движения гибкого вала, производится сопоставление результатов моделирования с результатами испытаний.

**Ключевые слова:** инклинометр; азимутальная коррекция; акселерометр; вибрационный источник; моделирование; математическая модель

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С развитием способов кустового бурения на первый план выступил вопрос точного позиционирования забойной компоновки буровой колонны в пространстве. В настоящее время для определения азимутального угла, зенитного угла и угла инструмента «tool face» скважины используются инклинометры, содержащие магнитные датчики, инерциальные датчики угловых скоростей и линейных ускорений. По их сигналам производится расчет текущего положения бура в земляной толще. Полученные таким образом системы навигации имеют ряд ограничений, связанных с принципами действия приборов и проводимыми измерениями. Так, к примеру, при бурении скважин в высоких широтах – более 60°, эффективность азимутальных датчиков (гирокоплов и магнитометров) снижается вследствие уменьшения горизонтальной составляющей скорости вращения Земли и горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, что приводит к значительным ошибкам вычисления азимутального положения. Если принять в учет, что на высоких широтах для снижения финансовых затрат на установку буровой платформы способы кустового бурения наиболее распространены и количество скважин проводимых из одного устья значительно выше, чем в малых и средних широтах, то малая точность определения местоположения буровой компоновки значительно повышает вероятность сближения и повреждения соседних

стволов скважин, что может привести к аварии. С указанной точки зрения при бурении в высоких широтах возникает повышенный интерес к способам точного определения местоположения буровой компоновки.

В работе предлагается к рассмотрению способ азимутальной коррекции инклинометра, основанный на измерении малых гармонических колебаний земной коры при прохождении их от источника вибрационных возмущений до приемника, а также рассматривается динамическая система источника и модель его движения.

## II. СПОСОБ АЗИМУТАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ ИНКЛИНОМЕТРА

Способ азимутальной коррекции инклинометра основан на измерении малых откликов земной коры в ответ на вибрационное возмущение и вычисления взаимного азимутального положения источников возмущения и приемников [1]. Для реализации способа азимутальной коррекции предлагается использовать схему, в которой источники вибрационного возмущения расположены в точках, на некотором заранее определенном отдалении от устья скважины и в направлении предполагаемого бурения. Для измерения малых откликов земной коры предлагается использовать приемники колебаний [2]. На рис. 1 представлена схема системы азимутальной коррекции инклинометра.

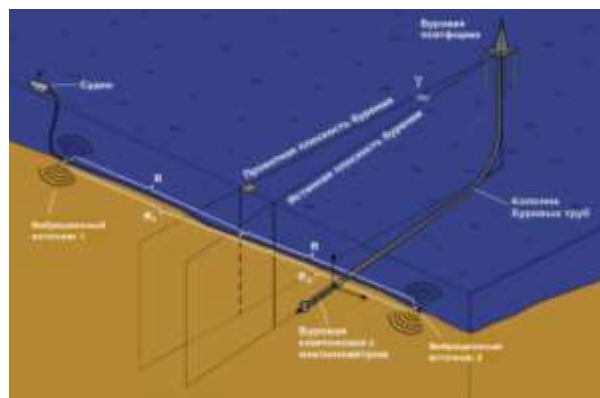


Рис. 1. Схема системы азимутальной коррекции.

Бурение скважины производится с морской буровой платформы по выбранному направлению с использованием способов проводки наклонно-направленных и горизонтальных скважин. В компоновке низа буровой колонны установлен инклинометр с акселерометрами, которые выступают в роли приемников системы азимутальной коррекции. На отдалении от устья скважины перпендикулярно на одинаковых расстояниях  $R$  от проектной плоскости бурения располагают источники вибрационных возмущений. Вибрационные источники устанавливаются в пластиковую трубу и укладываются на дно судна. В периоды остановов бурения производится подача питания на вибрационные источники, возбуждение колебаний в земной коре и измерение параметров малых вибрационных колебаний, проходящих к инклинометру акселерометра от источников возмущения. Расчет направления истинной плоскости бурения и ее отклонения от проектной плоскости бурения производится по величинам расстояний  $R_1$  и  $R_2$  между инклинометром и двумя вибрационными источниками. Для вычисления расстояний могут использоваться расчет временной задержки сигнала при прохождении от источника к приемнику по аналогии с глобальными системами позиционирования (GPS) и расчет степени затухания при прохождении колебаний сквозь земную кору.

Преимуществами указанной компоновки системы азимутальной коррекции являются возможность использования акселерометров [3] инклинометра в качестве приемников малых вибрационных колебаний земной коры. Такие навигационные акселерометры устойчивы к воздействиям значительных ударов и вибраций [4, 5, 6] и при этом позволяют производить измерения не только составляющих ускорения свободного падения, но и малые вибрационные сигналы, проходящие сквозь толщу земли. Помимо этого такая компоновка системы коррекции позволяет исключить влияние шумов от работы техники на земной поверхности на показания акселерометров. Другой особенностью указанной схемы является отказ от использования забойного двигателя скважины в качестве источника вибрационных возмущений земной коры. Стоит отметить, что, хотя забойным двигателем и создаются значительные вибрационные возмущения в широком диапазоне частот, однако они затрудняют выделение основной несущей частоты вибрационной посылки и поэтому значительно зашумляют измерения. По указанной причине в системе азимутальной коррекции предлагается использовать собственные вибрационные источники.

### III. ИСТОЧНИК ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Для создания вибрационной посылки, различимой на значительном расстоянии, и проведения качественных измерений необходимо использовать мощный источник вибрационного возмущения. В качестве такого источника предлагается использовать гибкий вал, приводящийся во вращение с помощью двигателя [7].

Конструкция вибрационного источника представлена на рис. 2.

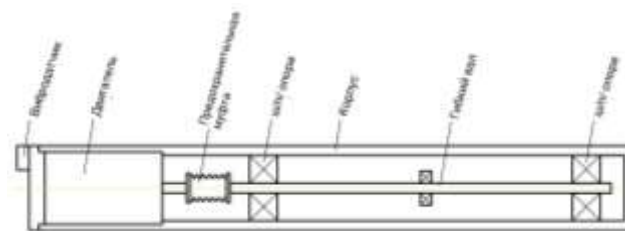


Рис. 2. Источник вибрационных возмущений на основе гибкого вращающегося вала.

При подаче питания на двигатель вал начинает вращаться, амплитуда колебаний нарастает. Для получения максимальной амплитуды колебаний предлагается скорость вращения выбрать близкой к резонансной, но не превосходящей ее. При этом частота возбуждения должна быть выбрана достаточно низкой (10–20 Гц), чтобы обеспечить малое затухание колебаний в земной толще.

При остановках бурения на источники подается питание и в течение времени порядка 1 минуты создаются колебания, амплитуды вибрационных которых измеряются и поддерживаются одинаковыми для обоих источников. Таким образом создается требуемая вибрационная посылка, которую в дальнейшем регистрируют акселерометры инклинометра. По измерениям акселерометров инклинометра производится формирование спектра вибрационных ускорений, действующих в забое в период останова бурения. По амплитудам спектра выносятся решения о соответствии истинной плоскости бурения проектной плоскости и о необходимости коррекции направления бурения.

### IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ИСТОЧНИКА

Для понимания физических процессов движения вала, а также с целью определения режима управления двигателем источника вибрационных возмущений для генерации вибрационной посылки произведено моделирование работы гибкого вала. Расчетная модель представлена на рис. 3.

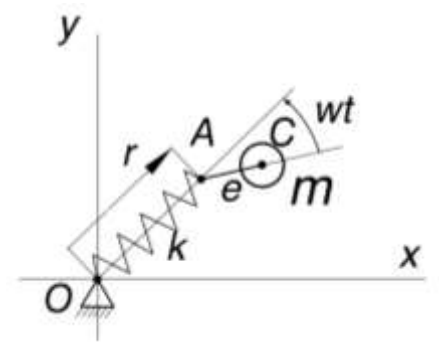


Рис. 3. Модель гибкого вала

Для расчетов вал представлен в виде точечной массы  $m$ , смещенной относительно оси вращения на некоторое расстояние  $e$ , точка A упруго с жесткостью  $k$  закреплена с

осью вращения и скользит по невесомой направляющей (ОА). Вращающий момент передается на вал от двигателя через упругую предохранительную муфту (рис. 2), изгибной жесткостью муфты в данных расчетах пренебрегаем. Подшипники принимаем абсолютно жесткими, допускающими только вращение вокруг оси, проходящей через точку О.

Моделированию динамических процессов во вращающихся конструкциях, валах и дисках посвящено множество работ. Уравнения движения составим на основе математических моделей, описанных в [8] и [9]. Согласно [8] уравнения движения точки будут иметь вид:

$$I_x \ddot{x} + D_x \dot{x} + k_x x = me\omega^2 \cos \omega t$$

$$I_y \ddot{y} + D_y \dot{y} + k_y y = me\omega^2 \sin \omega t$$

$$I_z \dot{\omega} = M_{дв}$$

Начальные условия соответствуют нулевым:

$$x = \dot{x} = y = \dot{y} = 0, \omega = 0;$$

Параметры системы:

$$m = 0.8 \text{ кг}; r = 0.005 \text{ м}; e = 0.001 \text{ м}; M_{ном} = 300 \text{ Нсм}$$

Решение уравнений осуществляется путем численного интегрирования системы из девяти обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка с помощью функции ode45 в программном комплексе Matlab. Графическое представление решения системы дифференциальных уравнений представлено на рис. 4.

По изображению рис. 4а видно, что разгон вала производится до некоторой предельной угловой скорости. Разгон может осуществляться постепенно путем медленного увеличения вращающего момента двигателя.

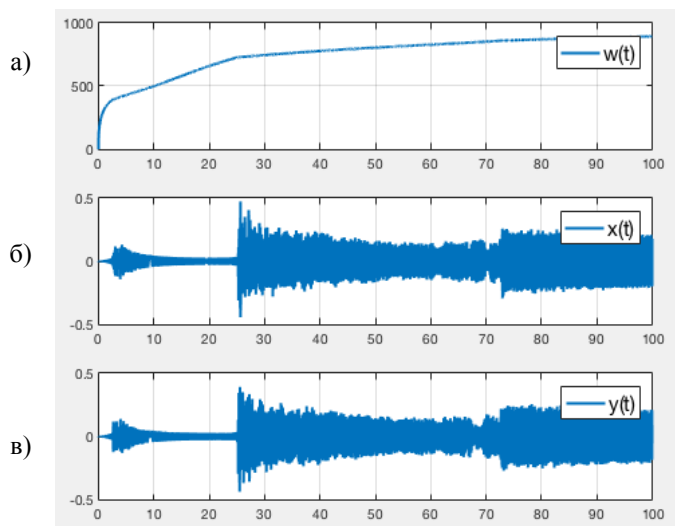


Рис. 4. а) Угловая скорость; б) и в) координаты x и y точечной массы.

Также возможен случай, когда момент от двигателя соответствует номинальному полному моменту и сразу в

полной мере передается на вал осуществляя его «быстрый» разгон.

Анализ процессов при пуске электрических машин [10] показывает, что пиковое значение момента сопротивления соответствует резонансной частоте вращения при медленном наборе скорости вращающимся валом, что обусловлено пиковой амплитудой колебаний вала согласно амплитудно-частотной характеристики. При неизменном медленном наборе скорости система становится неспособной осуществить переход к зарезонансной скорости вращения. Наблюдается эффект Зоммерфельда.

При высокой скорости набора частоты вращения («быстрый» разгон) при переходе резонанса система не успевает раскачаться до пикового значения амплитуды колебаний. Поэтому «быстрый» разгон В процессе разгона вал преодолевает несколько резонансных частот, что четко прослеживается по спадам амплитуд колебаний в направлении осей x и y (рис. 4б и 4в).

Интересным аспектом такого движения является кратное изменение частоты колебаний при переходе через резонанс. Так, к примеру, базовая частота колебаний вала составляющая ~19 Гц, при переходе через резонанс, возрастает до второй (кратной) частоты в ~40 Гц.

Необходимо отметить, что данное изменение частоты колебаний наблюдалось и при экспериментах с макетом вибрационного источника. При медленном наборе угловой скорости путем увеличения параметров электропитания двигателя гибкий вал достигал резонансной скорости вращения, частота вращения соответствовала резонансной, однако при дальнейшем разгоне амплитуда колебаний вала спадала, однако частота колебаний изменялась в 2 раза. При «быстром» разгоне вала переход колебаний вала с первой формы на вторую при достижении резонансной скорости вращения не происходил.

На основании описанного авторы пришли к выводу, что, несмотря на простую механическую схему источника вибрационного возмущения земной коры с гибким резонирующим валом, исследование его работы представляет сложную задачу и должно быть детально рассмотрено, так как в данном случае имеет место сложная динамическая система с распределенными инерционными и жесткостными параметрами. Ее анализ осложнен изменением во времени массово-инерционных характеристик гибкого вала в связи с изменением формы его упругой линии, а также неоднозначностью вариантов выбора управления параметрами электрического напряжения, подаваемого на электродвигатель, приводящим во вращение вал.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Система азимутальной акустической коррекции инклинометра [An acoustic azimuth correction system of an inclinometer] / Биндер Я.И., Гутников А.Л., Падерина Т.В., С.Ф. Коновалов, Д.В. Майоров, Русанов П.Г., Сидоров А.Г., Чулков В.Е., // 22-я международная конференция по интегрированным навигационным системам, МКИНС 2015 : Тез. докл. конф., Санкт-Петербург, 25 – 27 мая 2015г. с. 363-367.

- [2] Разработка блока приемника системы азимутальной акустической коррекции инклинометра [Elaboration of receiver unit of Azimuth acoustic correction system] / В.Е. Чулков, С.Ф. Коновалов, Д.В. Майоров и др. // Конференция российских молодых ученых в области электроники и электротехники : Тез. докл. конф., Москва, 29 янв - 01 февр 2018г. / IEEE Xplore Digital Library. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317435.
- [3] Микромеханический компенсационный акселерометр с магнитоэлектрическим датчиком момента [Micromechanical compensation accelerometer with magnetoelectric torquers] / Коновалов С.Ф., Майоров Д.В., Пономарёв Ю.А., Трунов А.А., Ларшин А.С., Егорова Т.Л. // 19-я международная конференция по интегрированным навигационным системам, МКИНС 2012: Тез. докл. конф., Санкт-Петербург, 2012г. с. 82-87.
- [4] Исследование работоспособности акселерометров при действии больших линейных ускорений, вибрационных и ударных нагрузок без использования центрифуг, вибрационных и ударных стендов [Research of operability of accelerometers at high-g linear acceleration, vibrating and shock effects without using test centrifuges, vibration and shock test tables] / Коновалов С.Ф., Полянков А.В., Трунов А.А., SEO J.B., Moon H.K. // 14-я международная конференция по интегрированным навигационным системам, МКИНС 2007: Тез. докл. конф., Санкт-Петербург, 2007г. с. 125-132.
- [5] Навигационный гибридный компенсационный МЭМС-акселерометр [Navigation-grade hybrid MEMS servo-accelerometer] / Коновалов С.Ф., Майоров Д.В., Подчерзцев В.П., Пономарёв Ю.А., Денисов Р.А., Меркулов В.А., Сивов В.А., Юрманов С.Ю. // 21-я международная конференция по интегрированным навигационным системам, МКИНС 2014: Тез. докл. конф., Санкт-Петербург, 2014г. с. 280-284.
- [6] Инерциальный метод измерения перемещений строительных свай в процессе забивки [Inertial measurements of driving pile displacements] / Коновалов С.Ф., Подчерзцев В.П. // Гирскопия и навигация. 2014. Вып. 5 (1). С. 33-39. DOI: 10.1134/S2075108714010052.
- [7] Электронный песчур: Denkmotoren, GR 80x40, 24V <https://www.dunkermotoren.com/en/products/brushed-dc-motors/detail/8844501002>
- [8] Chong-Won Lee. Vibrational analysis of rotors. Kluwer academic publishers. London, 2011. 311 с.
- [9] Исследование стабильности движения плоского диска при контакте с кожухом через лабиринтное уплотнение [Stability study of a bladed disk in interaction with a casing via a labyrinth seal] / Андреев Ф.Б., Thouverez F., Гуськов А.М., Blanc L. // Turbine Technical Conference and Exposition, ASME Turbo Expo 2014: Тез. докл. конф., Дюссельдорф, Германия, 2014г. DOI: 10.1115/GT2014-25954.
- [10] Горбунов А.А., Гаврилов Е.Н., Дмитриев В.Н. Анализ динамических режимов резонансных вибромашин (эффект Зоммерфельда) // Вестник Ульяновского государственного технического университета. Машиностроение. 2009. Вып. 2. С. 26-28.