

УДК 621.398

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИ УРАВНОВЕШЕННОГО БУРОВОГО СНАРЯДА НА ГРУЗОНЕСУЩЕМ КАБЕЛЕ С АВТОРЕЗОНАНСНЫМ ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Загривный Э.А., Губарь Н.С., Басин Г.Г.

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,

г. Санкт-Петербург

e-mail: Gubar_NS@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена конструктивная и расчетная схемы бурового снаряда. Записано выражение электромагнитного момента погружного вентильного электродвигателя. Показана функциональная схема электропривода возвратно – вращательного движения. Представлены математическая и имитационная модели динамически уравновешенного бурового снаряда. Приведены результаты моделирования колебаний буровой коронки динамически уравновешенного бурового снаряда на грузонесущем кабеле (ДУБС) в различных режимах: авторезонансном, при заклинивании статорной или роторной частей.

Ключевые слова: электромеханическая система, авторезонанс, буровой снаряд, грузонесущий кабель, колебания, методика, имитационная модель, моделирование, скважина, подледниковое озеро.

Буровым комплексом на основе электромеханического снаряда на грузонесущем кабеле КЭМС-132, разработанном в СПГГУ, достигнуты наивысшие мировые результаты при бурении ледника в Антарктиде на станции Восток – 3769,3 метра. На этой глубине 5 февраля 2012 года выполнено вскрытие крупнейшего подледникового озера Восток. Зарубежные буровые снаряды, применяемые для бурения ледников, мало отличаются по принципу действия от КЭМС-132. Общим недостатком всех указанных буровых снарядов является принципиальная невозможность проходки интервалов с кавернами из-за неработоспособности распорных устройств для компенсации реактивного момента на буровой коронке.

Разрабатываемые в СПГГУ динамически уравновешенные буровые снаряды (ДУБС) на грузонесущем кабеле с электроприводом возвратно-вращательного движения (ВВД) лишены указанных недостатков [1, 3, 6]. Это позволяет расширить область применения электромеханических буровых снарядов на грузонесущем кабеле и использовать их для взятия донных проб рек, озёр, морей и океанов, вскрытия продуктивных пластов, многорейсового бурения в шельфовых зонах с бортов неспециализированных судов, очистки призабойных

зон нефтяных и газовых скважин, а также скважин на пресные и минеральные воды.

Буровой снаряд представляет собой двухмассовую колебательную электромеханическую систему (ЭМС) с электроприводом возвратно-вращательного движения (рисунок 1,а). Статорная часть 2, 5, 10 погружного маслозаполненного асинхронного двигателя соединена с роторной частью 4, 8, 9 упругим элементом – пружиной кручения 6 [2].

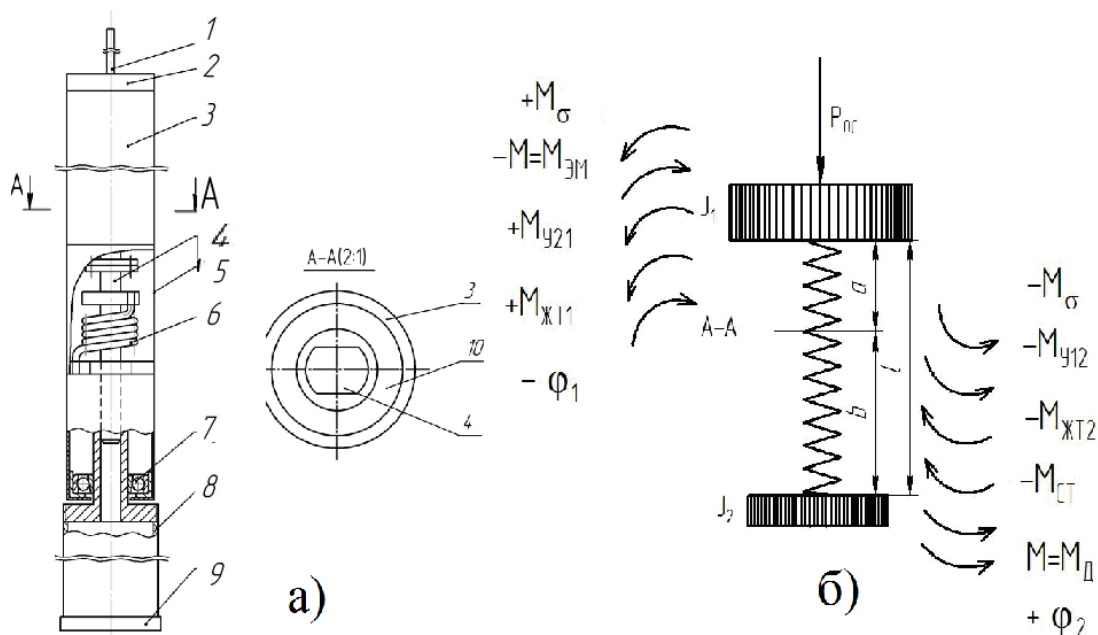


Рисунок 1, а) Конструктивная схема ДУБС: 1-грузонесущий кабель; 2-кабельный замок; 3-ЭД с электроотсеком; 4-ротор ЭД; 5-статорная труба; 6-пружина кручения; 7-подшипниковый узел; 8-колонковая труба; 9-буровая коронка, 10-статор ЭД; б) Расчетная схема ДУБС

При постановке снаряда на забой и подаче на статорные обмотки электродвигателя напряжения, формирующего знакопеременный электромагнитный момент, статорная и роторная части совершают возвратно-вращательные движения в противоположных направлениях.

На рисунок 1 б) представлена расчетная схема ДУБС, где статорная часть с моментом инерции J_1 под действием электромагнитного момента ЭД $M_{ЭМ}$ перемещается на угол φ_1 в неподвижной системе координат. Роторная часть с моментом инерции J_2 под действием того же электромагнитного момента $M_{ЭМ}$ поворачивается на угол φ_2 в противоположном направлении. Возвратно-вращательное движение статорной части относительно роторной происходит относительно неподвижного узлового сечения $A-A$ упругого элемента,

расположение которого зависит от соотношения моментов инерции и нагрузок на статорную и роторную части ДУБС [7].

Со стороны упругого элемента (пружины кручения), на статорную J_1 и роторную J_2 части действуют упругие моменты $M_{y_{12}}=M_{y_{21}}$. Со стороны буровой коронки и колонковой трубы на роторную часть с моментом инерции J_2 действует аддитивная комбинация вязкого $M_{ЖТ}$ и сухого $M_{СТ}$ трений; на статорную часть ДУБС с моментом инерции J_1 действует момент вязкого трения $M_{ЖТ}$.

Электромеханический комплекс ДУБС представлен колебательной системой с двумя степенями свободы. Для построения математической модели системы целесообразно воспользоваться уравнениями Лагранжа второго рода в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial q'_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial F_i}{\partial q'_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где T и Π – кинетическая и потенциальная энергии системы соответственно; q – обобщенные координаты системы; F – диссипативная функция; Q_i – обобщенная внешняя сила; n – число степеней свободы.

Принимая за обобщенные координаты $q_1 = \varphi_1$ и $q_2 = \varphi_2$, получим

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi'_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} + \frac{\partial F_{\varphi_1}}{\partial \varphi'_1} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_1} = Q_{\varphi_1} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi'_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} + \frac{\partial F_{\varphi_2}}{\partial \varphi'_2} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_2} = Q_{\varphi_2} \end{cases} \quad (2)$$

После вычисления T , Π и F и выполнения математических операций в (2) уравнения движения примут вид:

$$\begin{cases} J_1 \varphi_1'' + \mu_1 \varphi_1' - c(\varphi_2 - \varphi_1) = -M \\ J_2 \varphi_2'' + \mu_2 \varphi_2' + c(\varphi_2 - \varphi_1) = M \end{cases} \quad (3)$$

где J_1, J_2 моменты инерции статора и ротора соответственно, φ_1, φ_2 – углы поворота статорной и роторной частей соответственно, μ_1, μ_2 – коэффициенты жидкостного трения, c – коэффициент жесткости пружины кручения, $M, -M$ – электромагнитный момент электродвигателя [1].

После приведения уравнений (3) к машинному виду получим:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 = -\frac{\mu_1}{J_1} \cdot \dot{\varphi}_1 - \frac{c}{J_1} \varphi_1 + \frac{c}{J_1} \varphi_2 + \frac{M}{J_1} \\ \ddot{\varphi}_2 = -\frac{\mu_2}{J_2} \cdot \dot{\varphi}_2 - \frac{c}{J_2} \varphi_2 + \frac{c}{J_2} \varphi_1 - \frac{M}{J_2} \end{cases} \quad (4)$$

Известно выражение для определения электромагнитного момента:

$$M_{\text{ЭМ}} = K |\overline{\psi}_R \times \overline{\psi}_S| = K |\overline{\psi}_R \times \overline{\psi}| = K |\overline{\psi}_S \times \overline{\psi}|, \quad (5)$$

K – коэффициент пропорциональности; $\overline{\psi}_S$ – потокосцепление статора; $\overline{\psi}_R$ – потокосцепление ротора; $\overline{\psi}$ – результирующее потокосцепление ЭД (потокосцепление в воздушном зазоре), равное геометрической сумме $\overline{\psi}_R$ и $\overline{\psi}_S$ [4].

В работе предполагается использование погружного вентильного электродвигателя ВД16-117В5 производства ОАО «РИТЕК» (таблица 1). Электромагнитный момент этого электродвигателя удобно представить в виде:

$$M_{\text{ЭМ}} = K |\overline{\psi}_R \times \overline{\psi}_S| = \psi_R \cdot \psi_S \cdot \sin a$$

Таблица 1. Паспортные данные двигателя

Тип электродвигателя	Мощность кВт	Напряжение В	Ток А	КПД, %	Ток холостого хода, А	Скорость охлаждающей жидкости, м/с
ВД16-117В5	16	750	15	91	1,1	0,02

Учитывая что $\psi_S = kI$, $\psi_R = const$, для статической характеристики электромагнитного момента погружного вентильного двигателя можно записать:

$$M_{\text{ЭМ}} = kI\psi_R = k_M \cdot I \cdot \sin a. \quad (6)$$

Полагая, что магнитная система электродвигателя не насыщена, для амплитудного значения электромагнитного момента $M=f(I)$ можно записать

$$\frac{M_M - k_M I_H}{M - k_M I}, M = \frac{M_M}{I_H} I = k_M \cdot I, \text{ тогда } M = f(a) \quad M = k_M \cdot I \cdot \sin a, \quad (7)$$

где $k_M = \frac{M_M}{I_H}$, M_M - максимальное (амплитудное) значение электромагнитного момента, I_H - номинальное значение тока статора, I – ток статора. Резонансные

колебания реализуются путем реверсирования электромагнитного момента двигателя в точках $\varphi' = 0$.

Фазные обмотки “ $U_1 - U_2$ ”, “ $V_1 - V_2$ ” и “ $W_1 - W_2$ ”, соединённые как показано на рисунок 2(а), при питании от однофазного автономного инвертора тока позволяют получить возвратно-вращательные движения ротора с амплитудой 90 и размахом 180 геометрических градусов (рисунок 2 (а)).

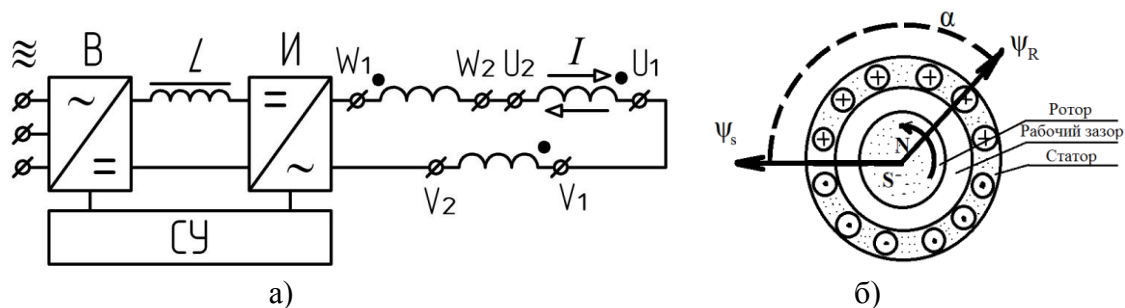


Рисунок 2. а) Функциональная схема ЭПВВД (180 геом. град.)

б) Взаимное расположение потокоцеплений ротора и статора в магнитном поле машины

Для исследования работы ДУБС в скважине создана имитационная модель с помощью программы MatLab, пакет Simulink (рисунок 3).

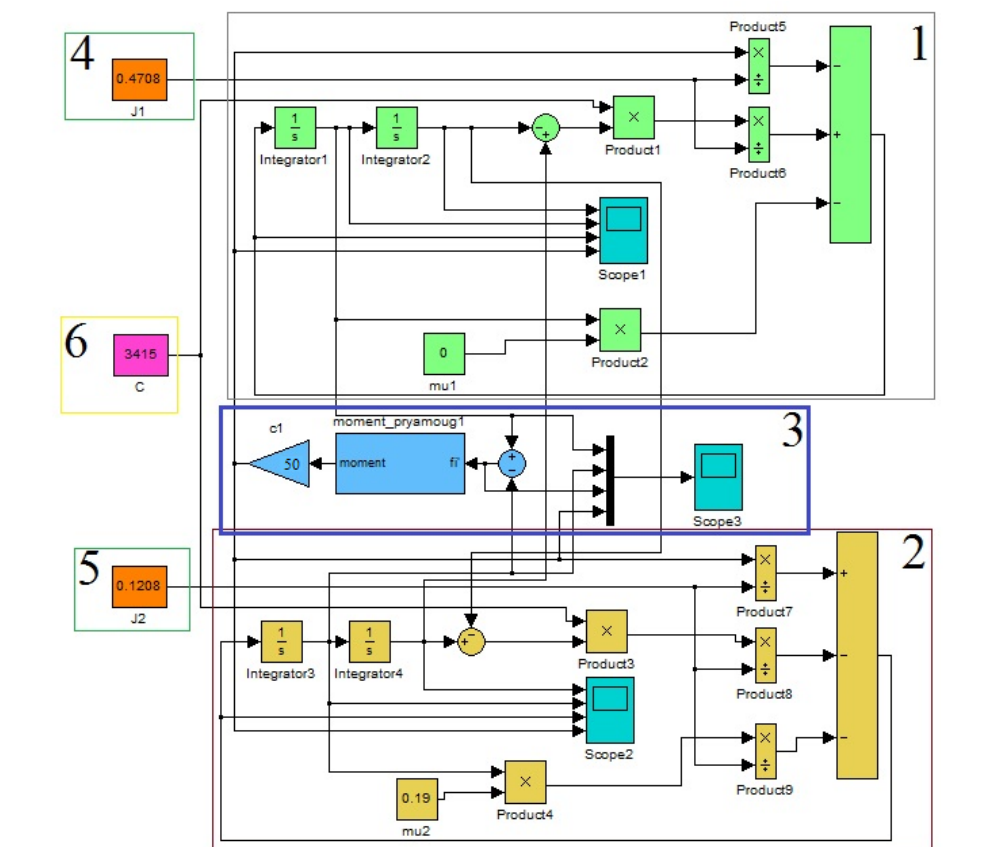


Рисунок 3. Имитационная модель ЭМС ДУБС:

1 – блок моделирования для статорной части; 2 – блок моделирования для роторной части; 3 – блоки выделения точек $\varphi' = 0$ (компаратор) и формирования электромагнитного момента прямоугольной формы; 4 – блок задания момента инерции статорной части J_1 ; 5 – блок задания момента инерции роторной части J_2 ; 6 – блок задания коэффициента жесткости C .

При исследовании режимов использовались динамические параметры ДУБС, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Принятые значения величин при моделировании

	Параметр	Обозначение	Значение
1	Амплитудное значение момента двигателя, Hm	$M_{ЭМ}$	50
3	Коэффициент вязкого трения, $Hm/рад$	μ_2	0,19
4	Частота колебаний ЭМС, Гц	f_P	30
5	Момент инерции статорной части снаряда, $кгм^2$	J_1	0,4708
6	Момент инерции роторной части снаряда, $кгм^2$	J_2	0,1208
7	Амплитуда колебаний статора, рад	φ_1	0,3206
8	Амплитуда колебания буровой коронки, рад	φ_2	1,25

Установлено, что при равенстве выполняемых работ амплитуда синусоидального электромагнитного момента связана с высотой электромагнитного момента прямоугольной формы выражением:

$$K_{II} = \frac{M_{IIIP}}{M_{SIN}} = \frac{101.0}{128.4} = 0.79, \quad (8)$$

где M_{IIIP} - амплитудное значение момента прямоугольной формы, Н·м; M_{SIN} - амплитудное значение момента синусоидальной формы, Н·м [5].

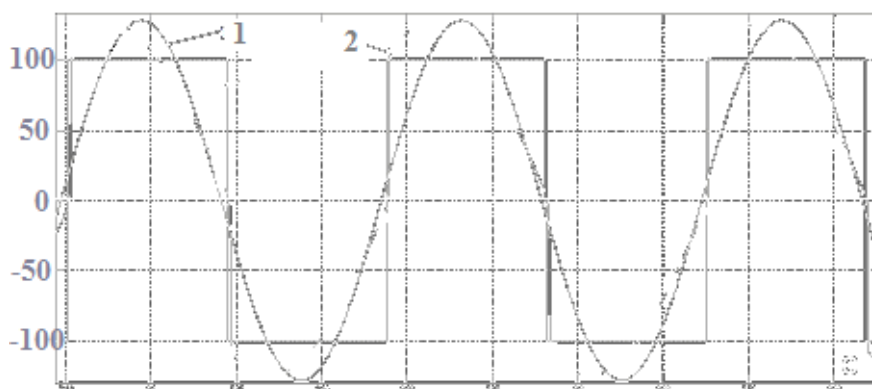


Рисунок 4. Формы задания электромагнитного момента:

- 1 – синусоидальный электромагнитный момент;
- 2- прямоугольный электромагнитный момент

Проведены исследования нормальных режимов с различными видами нагрузок на буровую коронку: вязкое и сухое трение, их комбинация и случайная составляющая нагрузки (рисунок 5)

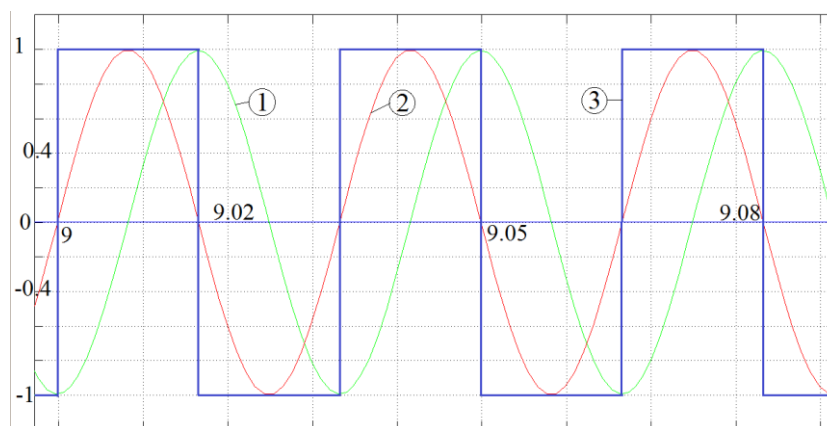


Рисунок 5. Осциллограммы рабочего режима ДУБС: 1 – $\varphi_2 = 1,25$ размах колебаний буровой коронки, 2 – $\varphi_2' = 250$ рад/с – скорость буровой коронки, 3 – электромагнитный момент $M = 50$ Н·м, ($\varphi_1 = 0,32$ – размах колебаний статорной части (не представлена))

Величины, представленные на графиках рисунков 5 и 6, показаны в виде безразмерной величины (лучше «в относительных единицах»).

Также проведены исследования аварийных режимов: 1) «заклинивание» статорной части (рисунок 6,а); 2) «заклинивание» роторной части (рисунок 6,б).

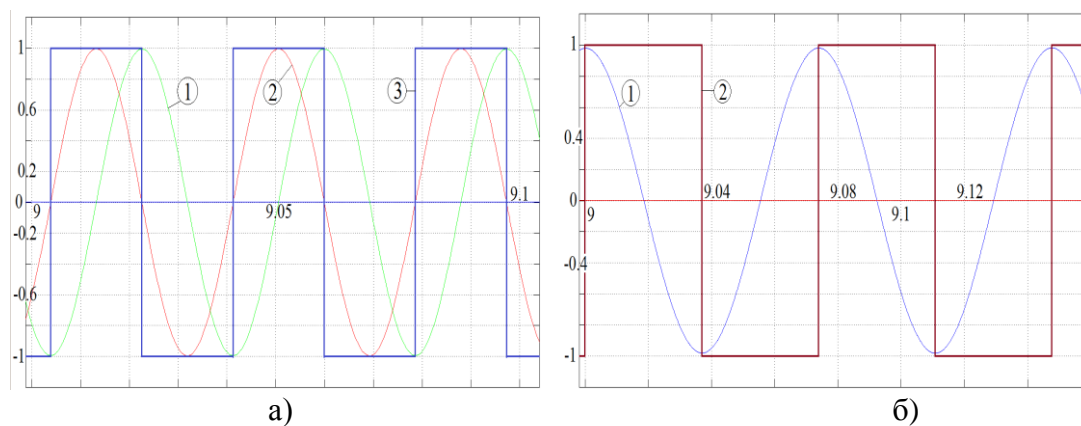


Рисунок 6. Осциллограммы работы ДУБС

а) при заклинивании статорной части: 1 – $\varphi_2 = 0,685$ размах колебаний роторной части, 2 – $\varphi_2' = 170$ рад/с скорость колебания буровой коронки, 3 – электромагнитный момент $M = 50$ Н·м;

б) при заклинивании роторной части $\varphi_1' = 85$ рад/с: 1 – $\varphi_1 = 1,165$ размах колебаний статорной части, 2 – электромагнитный момент $M = 50$ Н·м

Выводы

Разработанная имитационная модель динамически уравновешенного бурового снаряда позволяет:

1. По заданным конструктивным параметрам системы вычислять динамические параметры – моменты инерции статорной и роторной части, коэффициент жесткости пружины кручения при заданной частоте колебания буровой коронки.

2. Анализировать нормальные режимы при различных нагрузках вязкого, сухого трений и их комбинаций со случайной составляющей нагрузки.

3. Анализировать аварийные режимы (заклинивание статорной части или буровой коронки).

4. Искусственно создавать аварийный режим при анализе работы системы.

Литература

1. Загривный Э.А., Губарь Н.С. Вентильный электропривод возвратно-вращательного движения динамически уравновешенного бурового снаряда на грузонесущем кабеле.// «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность»: материалы докладов XVII всероссийской научно – технической конференции. Томск: «СПБ Графика», 2011, С.28-31.

2. Соловьёв В.А. Асинхронный электромеханический преобразователь возвратно-вращательного движения для динамически уравновешенного бурового снаряда на грузонесущем кабеле: автореф. дисс. канд. техн. наук СПГГИ (ТУ), СПб, 1998, 21 с.

3. Способ возбуждения и регулирования авторезонансных колебаний в электроприводе возвратно-вращательного движения/Загривный Э.А., Гаврилов А.Ю. Патент РФ, №2410826. 27 января 2011г.// <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=J742G4WIAHZVA86GS18C&GotoDoc=15&Query=1>

4. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводом.// Челябинск: ЮУрГУ, 2004, С.160-165

5. Фоменко А.Н. Анализ режимов работы электромеханического бурового комплекса на основе динамически уравновешенного бурового снаряда на грузонесущем кабеле: автореф. дисс...канд.техн. наук. СПГГУ, СПб, 2011, 21с.

6. Электромеханический колонковый буровой снаряд./ Загривный Э.А., Фоменко А.Н.,Иваник В.В. Патент РФ №95728. 11 декабря 2009г.// <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=J742G4WIAHZVA86GS18C&GotoDoc=27&Query=1>

7. Электропривод колебательного движения. / Загривный Э. А., Гаврилов А.Ю., Стародед С.С. Патент РФ №2401503. 10 октября 2010г.// <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=J742G4WIAHZVA86GS18C&GotoDoc=6&Query=1>

SIMULATION MODEL OF DINAMICALLY BALANCED DRILLING LINE ON CARRYING CABEL WITH AUTORESONANT RECTIFIER DRIVE

E.A. Zagrivniy, N.S. Gubar', G.G. Basin
National mineral-resources university «Mining», St-Petersburg,
e-mail: Gubar_NS@mail.ru

Abstract. Construction diagram and analytical model were observed. Electromagnetic torque equation of downhole thyatron motor was shown. Complete circuit diagram of alternate motion electric drive was given. Mathematical and simulation models of dynamically balanced drilling line are shown. Results of oscillation simulation of dynamically balanced drilling line bit are presented. Autoresonant, stator or rotor fastening duties are examined.

Keywords: electromechanical system, autoresonance, drilling line, carrying cable, oscillation, method, simulation model, simulation, well, subglacial lake

References

1. Zagrivniy E.A., Gubar N.S. Valve electric drive of reciprocating motion of dynamically balanced rotary head on carrying cable. "Energetics: efficiency, reliability, safety": materials of presentations of XVII Russian scientific and technic conference. Tomsk "SPB Graphics" 2011, pages 28-31.
2. Soloviev V.A. Asynchronous electromechanical converter of reciprocating motion for dynamically balanced rotary head on carrying cable.
3. Method of excitement and control of autoresonance vibration in electric drive./ Zagrivniy E.A., Gavrilov U.A. Patent RF № 2410826, 27.01.2011.// <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=J742G4WIAHZVA86GS18C&GotoDoc=15&Query=1>
4. Usinin U.S. Electric Drive Control. Chelyabinsk. UURGU. 2004, pages 160-165.
5. Fomenko A.N. Analysis of operating modes of electromechanical drilling tool based on dynamically balanced rotary head on carrying cable.
6. Electromechanical core drilling tool./ Zagrivniy E.A., Fomenko A.N., Ivanik V.V. Patent RF №95728, 11.12.2009.// <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=J742G4WIAHZVA86GS18C&GotoDoc=27&Query=1>

7. Electric drive of oscillating motion./ Zagrivniy E.A., Gavrilov U.A., Staroded S.S. Patent RF, №2401503, 10.10.2010.// <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=J742G4WIAHZVA86GS18C&GotoDoc=6&Query=1>

Сведения об авторах

Загривный Э.А., проф. кафедры «Электротехника, электромеханика, электроэнергетика», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург

E.A. Zagrivniy, prof. department of «Electrotechnics and electromechanics», National mineral-resources university «Mining», St-Petersburg

e-mail: Zagrivniy@yandex.ru

Губарь Н.С., аспирант кафедры «Электротехника, электромеханика, электроэнергетика», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург

N. S. Gubar, postgraduate student department of «Electrotechnics and electromechanics», National mineral-resources university «Mining», St-Petersburg

e-mail: Gubar_NS@mail.ru

Басин Г.Г., аспирант кафедры «Электротехника, электромеханика, электроэнергетика», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург

G.G.Basin, postgraduate student of department «Electrotechnics and electromechanics» National mineral-resources university «Mining» St-Petersburg,

e-mail: Finchi@list.ru