

ДИНАМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ГЛУБОКОВОДНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

**В.В. Чернышев, В.В. Жога, Н.Г. Шаронов, В.В. Арыканцев,
И.П. Вершинина, Н.В. Коломин, А.В. Нелюбова**

В настоящее время находят применение технологии освоения минеральных ресурсов Мирового океана с помощью роботизированных добычных систем, передвигающихся по дну. Подводные манипуляторы могут использоваться для сбора рассредоточенных по морскому дну твердых полезных ископаемых. Для эффективной работы необходимы высокоскоростные манипуляторы. В манипуляторах скорость звеньев ограничена высокими энергозатратами на преодоление сил инерции в каждом цикле движения. Цель работы – исследование динамики высокоскоростного манипулятора на базе электродвигателей колебательного движения резонансного типа. Резонансная настройка обеспечивает рекуперацию энергии, затраченной на преодоление сил инерции. В глубоководных условиях электрическая часть такого вибропривода может быть легко изолирована от внешней среды. Проведено моделирование динамики привода манипулятора, построенного на базе электродвигателей колебательного движения с поворотным якорем. При разработке математической модели привода использовались уравнения Лагранжа–Максвелла. Моделирование показало, что из-за позиционной зависимости электромагнитного вынуждающего момента рассматриваемые электродвигатели не могут обеспечить достаточно больших амплитуд колебаний. Рассмотрена возможность усиления колебаний методами динамического управления. Показано, что усиления колебаний можно достичь путем введения дополнительной степени свободы в электромеханическую систему «электродвигатель – исполнительный механизм». Предлагается связать схват манипулятора с якорем электродвигателя посредством упругого элемента, образующего вместе с массой схвата инерционный динамический гаситель колебаний якоря. За счет динамического гашения происходит перераспределение колебательной энергии от якоря к исполнительному механизму. В результате амплитуда колебаний схвата возрастает, а амплитуда колебаний якоря, наоборот, стремится к нулю. Причем можно добиться динамической стабилизации колебаний якоря в зоне с максимальными значениями позиционной зависимости вынуждающего электромагнитного момента. Численное моделирование показало, что таким способом можно в десятки раз увеличить амплитуду колебаний исполнительного механизма.

Ключевые слова: подводные робототехнические системы, роботы, передвигающиеся по дну, манипуляторы резонансного типа, электродвигатели колебательного движения, колебания электромеханических систем, динамическое управление колебаниями.

Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к минеральным ресурсам Мирового океана [1–4]. К наиболее передовым технологиям добычи подводных полезных ископаемых относятся технологии, основанные на необитаемых роботизирован-

ных добычных системах, передвигающихся по дну [5]. Практическая реализация таких проектов уже осуществляется на базе донных гусеничных машин [5–7]. Существуют различные концепции разработки глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых. Их можно подразделить на технологии, связанные с подъемом на поверхность значитель-

ных объемов донного грунта, который сбрасывается обратно после отделения руды, и технологии, основанные на непосредственном сборе донного рудного материала [5, 8]. В первом случае образуются шлейфы от наносов и значительные объемы воды загрязняются в результате добычи минералов [9]. Второй способ менее энергозатратен и более экологичен – на поверхность поднимается только рудный материал. Таким способом, например, можно добывать железомарганцевые конкреции, кобальтомарганцевые корки и глубоководные полиметаллические сульфиды. Железомарганцевые конкреции образуются на поверхности глубоководных абиссальных равнин и содержат в основном марганец и железо, а также значительное количество других металлов, в том числе редкоземельных. Кобальтомарганцевые корки располагаются на вершинах и склонах подводных вулканических гор и кроме кобальта и марганца содержат медь, никель, платину и другие металлы. Донные залежи полиметаллических сульфидов в основном расположены вдоль океанических хребтов. Их образование связано с активными гидротермальными источниками. Полиметаллические сульфиды богаты медью, золотом и другими металлами. Для сбора кобальтомарганцевых корок и полиметаллических сульфидов необходимо их предварительное разрушение и отделение от породы залегания (рис. 1, а). Железомарганцевые конкреции зачастую просто лежат на поверхности дна (рис. 1, б). Для сбора рассредоточенных по морскому дну конкреций могут быть использованы манипуляторы. На отечественном рынке уже есть компактные подводные манипуляторы с электроприводом, пригодные для сбора конкреций [10]. Наибольшее распространение получили манипуляторы с бесколлекторными двигателями постоянного тока. Для увеличения рабочей глубины манипуляторы имеют компенсацию давления. Вме-

сте с тем скорость перемещения звеньев таких манипуляторов ограничена высокими энергозатратами на преодоление сил инерции. Поскольку сбор конкреций предполагается осуществлять поштучно, то для эффективной работы необходимы высокоскоростные манипуляторы.

В системах с периодическим движением исполнительных звеньев энергозатраты на преодоление циклов сил инерции могут быть существенно снижены за счет использования привода резонансного типа. Манипуляторы резонансного типа имеют высокое быстродействие при одновременном снижении энергозатрат [11]. В работе рассматриваются манипуляторы с приводом на базе электродвигателей колебательного движения. Резонансная настройка такого вибропривода обеспечивает рекуперацию энергии, затраченной на преодоление сил инерции в каждом цикле движения. В глубоководных условиях электрическая часть вибропривода может быть легко изолирована от внешней среды прочным корпусом. Электромагнитные вибраторы (синхронные реактивные электродвигатели колебательного движения) доказали свою эксплуатационную надежность в различных технологических процессах: в виброинструментах, бытовых приборах, при транспортировке сыпучих материалов, их дозировании, уплотнении, разрыхлении и т.д. [12, 13]. Также они обеспечивают бесступенчатую, точную регулировку амплитуды колебаний, достигают нужной амплитуды сразу после включения. Благодаря отсутствию изнашиваемых механических деталей имеют длительный срок службы. Кроме того, электропривод рассматриваемого типа позволяет реализовывать движение в двух режимах: в периодическом (при питании переменным током) и обычном (при питании постоянным током с варьлируемым напряжением). В то же время электродвигатели колебательного движения не обес-



а



б

Рис. 1. Полезные ископаемые морского дна

печивают достаточно больших амплитуд колебаний. Это обусловлено тем, что электродвигатели с поступательным движением якоря имеют амплитуды колебаний, ограниченные величиной воздушного зазора δ в магнитопроводе, а электродвигатели с поворотным якорем хотя и работают при минимальном зазоре δ , но имеют позиционную зависимость вынуждающего момента. Из-за позиционной зависимости среднее за период колебаний значение вынуждающего электромагнитного момента уменьшается с увеличением амплитуды колебаний [14].

■ Цель и задачи исследования

В Волгоградском государственном техническом университете для изучения шагающего способа передвижения в подводных условиях разработан 6-ногий шагающий аппарат (модульно-аппаратный комплекс) МАК-1 (рис. 2, а). Робот представляет собой уменьшенный в размерах прототип многоцелевого шагающего шасси для подводно-технических работ. Шагающие машины в сравнении с гусеничными обладают более высокими возможностями по грунтовой и профильной проходимости и могут обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства [15, 16]. Шагающий аппарат испытан в Кандалакшском заливе Белого моря, на озере Байкал, а также в условиях водных объектов Волго-Ахтубинской поймы [17–19]. Часть испытаний шагающего аппарата проведена в подводных условиях. Испытания подтвердили его высокую проходимость и повышенные тяговые свойства. Робот также оказался проще в управлении по сравнению с известными аналогами. В настоящее время для робота разрабатываются различные навесные технологические устройства, предназначенные для проведения подводно-технических работ. В частнос-

ти, был разработан и испытан манипулятор на базе линейного электропривода (рис. 2, б). Манипулятор в принципе может быть использован для сбора полезных ископаемых, рассредоточенных на поверхности морского дна. Однако линейный электропривод манипулятора не обеспечивает требуемого быстродействия. В настоящее время прорабатывается возможность повышения быстродействия манипулятора за счет использования привода резонансного типа, построенного на базе электродвигателей колебательного движения.

Цель работы – исследование динамики высокоскоростного привода подводного манипулятора на базе электродвигателей колебательного движения резонансного типа. В соответствии с поставленной целью проведено математическое моделирование динамики привода манипулятора, построенного на базе электродвигателей колебательного движения, и рассмотрена возможность увеличения амплитуды его колебаний методами динамического управления колебаниями.

■ Динамика электродвигателя колебательного движения с поворотным якорем

В приводе подводного манипулятора предполагается использовать синхронные реактивные электродвигатели колебательного движения с поворотным якорем. Вибраторы такого типа обеспечивают безударный режим работы при минимальном воздушном зазоре в магнитопроводе. Схема электродвигателя колебательного движения приведена на рис. 3, а.

У синхронных реактивных электродвигателей колебательного движения влиянием гистерезиса и рассеяния магнитных потоков на механические ко-



а



б

Рис. 2. Подводный шагающий робот МАК-1: подводные испытания (а); испытания на устойчивость к опрокидыванию (б)

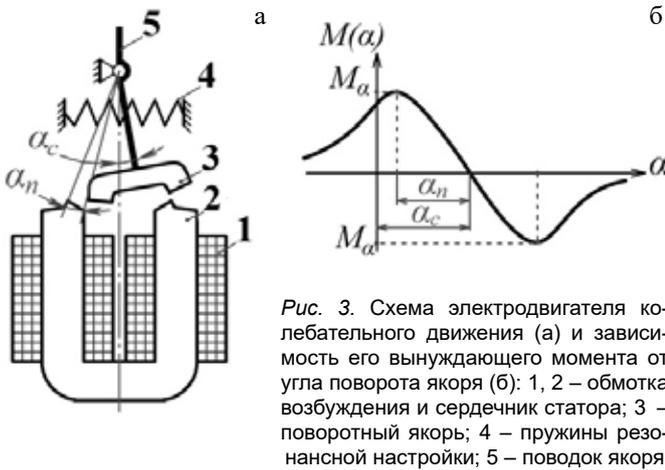


Рис. 3. Схема электродвигателя колебательного движения (а) и зависимость его вынуждающего момента от угла поворота якоря (б): 1, 2 – обмотка возбуждения и сердечник статора; 3 – поворотный якорь; 4 – пружины резонансной настройки; 5 – поводок якоря

лебания и токи можно пренебречь. Тогда в случае питания от сети переменного тока и ненасыщенного магнитопровода уравнения Лагранжа–Максвелла [20] для рассматриваемой системы примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W}{\partial i} \right) + \frac{\partial \Psi}{\partial i} &= U_a \cos pt, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial (T+W)}{\partial \alpha} + \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} &= Q_\alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

где i – ток в цепи обмотки возбуждения; α – угол поворота якоря, отсчитываемый от статического его положения; U_a и p – амплитуда напряжения и частота питающей сети; $W = Li^2/2$ – энергия магнитного поля системы, где $L=L(\alpha)$ – индуктивность магнитопровода, являющаяся функцией угла поворота якоря; $\Psi = ri^2/2$ – электрическая диссипативная функция; r – активное сопротивление обмотки возбуждения электродвигателя; $T = J\dot{\alpha}^2/2$ и $\Pi = c_\alpha \alpha^2/2$ – кинетическая и потенциальная энергия системы соответственно; J – момент инерции якоря относительно оси вращения якоря; $c_\alpha = c_1 l_1^2$ – приведенная к оси якоря крутильная жесткость пружин резонансной настройки; l_1 и c_1 – плечо и суммарная жесткость пружин резонансной настройки; Q_α – непотенциальная обобщенная сила отнесенная к обобщенной координате $q = \alpha$.

При линейном неупругом сопротивлении $Q_\alpha = -\mu\dot{\alpha}$, где μ – коэффициент сопротивления, система уравнений (1) приводится к виду:

$$\begin{aligned} \frac{d(Li)}{dt} + ri &= U_a \cos pt, \\ \ddot{\alpha} + 2n\dot{\alpha} + k^2\alpha &= M(\alpha, t)/J, \end{aligned} \quad (2)$$

где $k = \sqrt{c_\alpha/J}$ – собственная частота системы; $n = \mu/2J$ – коэффициент демпфирования;

$M(\alpha, t) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\alpha}$ – вынуждающий электромагнитный момент.

У рассматриваемых электродвигателей при их питании переменным током активное сопротивление обмотки возбуждения мало по сравнению с индуктивным. Пренебрегая активным сопротивлением обмотки возбуждения из системы уравнений (2) получаем дифференциальное уравнение движения якоря

$$\ddot{\alpha} + 2n\dot{\alpha} + k^2\alpha = \frac{M(\alpha)}{J} \sin^2 pt, \quad (3)$$

где

$$M(\alpha) = \frac{U_a^2}{2p^2 L^2} \frac{dL}{d\alpha}. \quad (4)$$

Зависимость вынуждающего электромагнитного момента от угла поворота якоря (4) удобно представить в виде $M(\alpha) = M_a f(\alpha)$, где M_a – амплитуда вынуждающего момента; $f(\alpha) = g(\alpha)/g_{\max}$ – функция, отражающая позиционную зависимость момента; $g(\alpha) = L^2 dL/d\alpha$; g_{\max} – максимальное значение функции $g(\alpha)$. Амплитуда электромагнитного момента M_a зависит от амплитуды силы тока i , а также от конструкции и величины воздушного зазора δ . Позиционные характеристики $f(\alpha)$ для электродвигателей с наиболее распространенной геометрией воздушного зазора определялись экспериментально. Для этого использовалось тензометрическое устройство для определения вынуждающего момента электромагнитного вибровозбудителя с поворотным якорем. В зависимости от геометрии, конструкции и величины воздушного зазора δ полученные позиционные зависимости $f(\alpha)$ несколько видоизменялись. Вместе с тем принципиальный вид позиционной зависимости оставался неизменным. Принципиальный вид функции $f(\alpha)$ приведен на рис. 3, б. Максимальное значение функции $f(\alpha) = 1$ имеет место при $\alpha = \alpha_c - \alpha_n$, где α_c и α_n – углы (рис. 3), характеризующие положение статического равновесия якоря и ширину полюса сердечника статора соответственно. В этом положении внешний зуб сердечника якоря располагается напротив внутреннего зуба сердечника статора. При симметричной установке сердечника якоря ($\alpha = \alpha_c$) функция $f(\alpha) = 0$ и вынуждающего момента нет. Если $\alpha > \alpha_c$, то вынуждающий электромагнитный момент меняет знак и превращается в тормозящий. Нелинейная позиционная зависимость вынуждающего момента обуславливает отличие динамики рассматриваемой колебательной системы от линейных систем с чисто гармоническим силовым возбуждением.

Дифференциальное уравнение (3) с учетом (4) решалось численно с помощью ЭВМ. Было исследовано влияние на амплитуду α_a вынужденных колебаний якоря величины коэффициента демпфирования n , угла α_n , амплитуды вынуждающего момента, отнесенного к моменту инерции ротора M_a/J , угла α_c и степени расстройки системы от резонанса $\beta = 2p/k$. Полученные решения в виде периодических зависимостей $\alpha(t)$ имели частоту, равную удвоенной частоте питающей сети $\omega = 2p$, и положительное смещение центра колебаний от положения статического равновесия якоря. Это объясняется появлением постоянной составляющей и удвоением частоты из представления $\sin^2 pt = (1 - \cos 2pt)/2$. Максимальная амплитуда колебаний якоря во всех исследованных случаях приблизительно равнялась угловой ширине полюса сердечника статора $\alpha_a \approx \alpha_n$. Это объясняется тем, что при $\alpha > \alpha_c$ вынуждающий электромагнитный момент превращается в тормозящий. Таким образом, из-за позиционной зависимости электромагнитного вынуждающего момента электродвигателя колебательного движения не могут обеспечить достаточно больших амплитуд колебаний исполнительным элементам манипулятора.

■ Динамическое усиление колебаний в виброприводе манипулятора

Динамическое усиление колебаний в приводе на базе электродвигателей колебательного движения может быть достигнуто путем введения дополнительной степени свободы в электромеханическую

систему «электродвигатель – исполнительный механизм». Для этого исполнительный элемент манипулятора должен быть связан с якорем электродвигателя посредством дополнительного упругого элемента, который образует вместе с подвижной массой исполнительного механизма инерционный динамический гаситель колебаний якоря. Расчетная схема такого устройства показана на рис. 4, а.

При питании от источника переменного тока и ненасыщенного магнитопровода уравнения Лагранжа–Максвелла [20] для данной электромеханической системы, если принять за обобщенные координаты $q_1 = x$ и $q_2 = \alpha$, где x и α – перемещение исполнительного органа привода и угол поворота якоря, соответственно примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W}{\partial \dot{i}} \right) + \frac{\partial \Psi}{\partial i} &= U_a \cos pt, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial (T+W)}{\partial \alpha} + \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} &= Q_\alpha, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial (T+W)}{\partial x} + \frac{\partial \Pi}{\partial x} &= Q_x, \end{aligned} \quad (5)$$

где $Q_\alpha = 0$ и $Q_x = -\mu \dot{x}$ – непотенциальные обобщенные силы, отнесенные к обобщенным координатам q_1 и q_2 соответственно. Здесь Q_x обусловлена гидравлическим сопротивлением воды, оно считалось линейным.

Кинетическая энергия T и потенциальная энергия Π в рассматриваемом случае равны соответственно $T = (J\dot{\alpha}^2 + m\dot{x}^2)/2$ и $\Pi = (c_1 l_1^2 \alpha^2 + c_2 (x - l_2 \alpha)^2)/2$, где m – масса исполнительного элемента и присоединенных к нему деталей; c_2 – жесткость упругого элемента динамического гасителя; l_2 – длина поводка якоря электродвигателя.

Тогда система уравнений (5) примет вид:

$$\begin{aligned} d(Li)/dt + ri &= U_a \cos pt, \\ J\ddot{\alpha} + c_1 l_1 \alpha - c_2 l_2 (x - l_2 \alpha) &= \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\alpha}, \\ m\ddot{x} + \mu \dot{x} + c_2 (x - l_2 \alpha) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Пренебрегая активным сопротивлением обмотки возбуждения r , из (6) получаем для якоря и рабочего элемента привода следующие дифференциальные уравнения движения:

$$\begin{aligned} J\ddot{\alpha} + c_1 l_1 \alpha - c_2 l_2 (x - l_2 \alpha) &= M(\alpha) \sin^2 pt, \\ m\ddot{x} + \mu \dot{x} + c_2 (x - l_2 \alpha) &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где вынуждающий электромагнитный момент $M(\alpha)$ определяется по формуле (4).

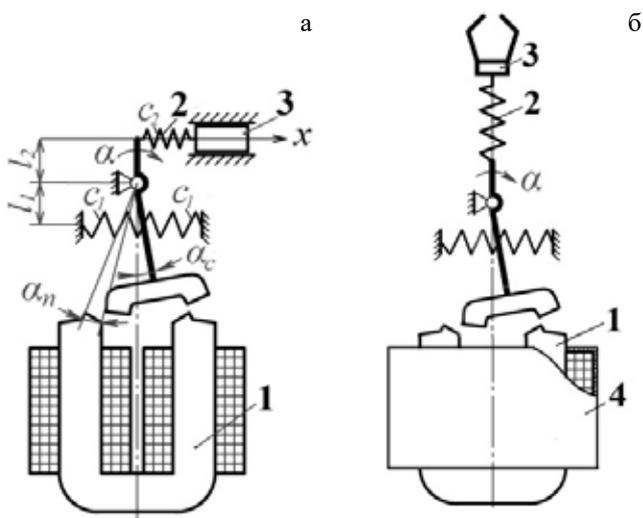


Рис. 4. Расчетная схема привода с инерционным гасителем колебаний якоря (а) и схема манипулятора с «гибкой рукой» (б): 1 – электродвигатель; 2 – дополнительный упругий элемент; 3 – исполнительный элемент манипулятора, 4 – прочный корпус

Электромагнитный момент $M(\alpha)$ является функцией угла поворота якоря. Нелинейная позиционная зависимость вынуждающего момента обуславливает отличие динамики рассматриваемой колебательной системы от линейных систем с гармоническим силовым возбуждением. Однако при динамическом гашении колебаний якоря его амплитуда будет стремиться к нулю. При малых колебаниях якоря влиянием позиционной зависимости вынуждающего момента можно пренебречь, тогда силовое возбуждение в электродвигателе будет чисто гармоническим. При соответствующей настройке вибродвигателя можно ограничить колебания якоря зоной с максимальным значением позиционной зависимости $f(\alpha) = 1$. Это целесообразно с точки зрения увеличения удельной мощности электропривода. Тогда $M(\alpha) = M_a = const$ и дифференциальные уравнения системы (7), учитывая что $\sin^2 pt = (1 - \cos 2pt)/2$, приводятся к линейному виду. Решая полученную систему уравнений, находим амплитуду колебаний привода x_a и амплитуду колебаний якоря α_a :

$$x_a = M_a c_2 l_2 / \sqrt{\Delta}, \quad \alpha_a = \sqrt{[(c_2 - m\omega^2)^2 + \mu^2 \omega^2]} / \Delta, \quad (8)$$

где

$$\Delta = [(c_2 - m\omega^2)(c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2 - J\omega^2) - c_2^2 l_2^2]^2 + \mu^2 \omega^2 (c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2 - J\omega^2)^2.$$

Анализ выражений (8) показывает, что наибольший эффект динамического гашения будет иметь место при $c_2/m = \omega^2$. В этом случае $c_2 - m\omega^2 = 0$ и амплитуда колебаний якоря стремится к нулю. В случае отсутствия неупругого сопротивления ($\mu = 0$) якорь полностью остановится. Колебания рабочего органа при этом, наоборот, существенно возрастут. При малом неупругом сопротивлении, как показывает анализ, амплитуда колебаний рабочего органа может возрасти в десятки раз.

В подводных условиях $\mu \neq 0$. На динамику манипулятора существенное влияние оказывает водная среда. В рассматриваемом случае гидравлическое сопротивление воды считалось линейным $Q_x = -\mu \dot{x}$, где μ – коэффициент гидравлического сопротивления воды.

Наличие неупругих сопротивлений приводит к снижению эффекта динамического гашения. В соответствии с (9) соотношение амплитуд колебаний равно

$$x_a / \alpha_a = M_a c_2 l_2 / \sqrt{(c_2 - m\omega^2)^2 + \mu^2 \omega^2}. \quad (9)$$

При $c_2/m = \omega^2$ из (9) получаем $x_a / \alpha_a = M_a m l_2 / \mu$. При $\mu = 0$ отношение амплитуд равно бесконечности,

так как амплитуда якоря равна нулю. При $\mu \neq 0$ отношение амплитуд x_a / α_a уменьшается пропорционально росту μ .

Вариант манипулятора с предлагаемым приводом представлен на рис. 4, б. Здесь роль упругого элемента динамического гасителя выполняет «гибкая рука» манипулятора, выполненная в виде винтовой пружины. Манипулятор работает следующим образом. При передвижении шагающего робота по дну «гибкая рука» манипулятора снабженная схватом, выполняет сканирующие движения в горизонтальной плоскости. Схват электромагнитный, ортогонального типа. Плоскость перемещения руки манипулятора может несколько изменяться путем изменения наклона корпуса шагающего аппарата. Колебания осуществляются с удвоенной частотой питающей сети. Частотное регулирование электропривода шагающего робота позволяет варьировать частоту питающей сети в широких пределах. Для обеспечения динамического гашения колебаний якоря вибродвигателя поперечная жесткость пружины должна удовлетворять условию $c_2/m = \omega^2$. Для нахождения полиметаллических креплений схват манипулятора оснащен видеокамерой, датчиками индукционного типа. Захваченный рудный материал помещается в бункер шагающего робота, а затем перемещается в хранилище для дальнейшей транспортировки на поверхность.

Заключение

Моделирование показало, что из-за позиционной зависимости электромагнитного вынуждающего момента электродвигателя колебательного движения с поворотным якорем не могут обеспечить достаточно больших амплитуд колебаний. Усиления колебаний в приводе манипулятора на базе синхронных реактивных электродвигателей колебательного типа можно достичь путем введения дополнительной степени свободы в электромеханическую систему «электродвигатель – исполнительный механизм». Предлагается связать схват манипулятора с якорем электродвигателя посредством упругого элемента, образующего вместе с массой схвата инерционный динамический гаситель колебаний якоря. За счет эффекта динамического гашения происходит перераспределение колебательной энергии от якоря к исполнительному механизму. В результате амплитуда колебаний схвата возрастает, а амплитуда колебаний якоря, наоборот, стремится к нулю. Причем можно добиться динамической стабилизации колебаний якоря в зоне с максимальными значениями позиционной зависимости вынуждающего электромагнитного момента. Чис-

ленное моделирование показало, что таким способом можно в десятки раз увеличить амплитуду колебаний исполнительного механизма. Предлагаемое техническое решение может быть востребовано в высокоскоростных манипуляторах периодического действия, где имеются высокие энергозатраты на преодоление сил инерции в каждом цикле движения. В частности, полученные результаты могут быть востребованы при разработке резонансных манипуляторов под-

водных робототехнических систем. Электрическая часть такого манипулятора может быть легко изолирована от внешней среды. Это позволяет использовать его в глубоководных условиях.

Гранты и программы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00720, <https://rscf.ru/project/23-29-00720/>.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев С.И., Черкашев Г.А. Минеральные ресурсы глубоководных районов Мирового океана: состояние проблемы изучения и освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2018. № 1. С. 10–15.
2. Miller K.A., Thompson K.F., Johnston P., Santillo D. An Overview of Seabed Mining Including the Current State of Development, Environmental Impacts, and Knowledge Gaps // *Frontiers in Marine Science*. 2018. Vol. 4, No. JAN. P. 418.
3. Щербатюк А.Ф. Об использовании необитаемых подводных аппаратов при освоении месторождений глубоководных минералов // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 2(44). С. 4–19.
4. Горшков А.Г. Технологические вопросы освоения металлосодержащих полезных ископаемых Мирового Океана // Морские информационно-управляющие системы. 2019. № 1. С. 54–73.
5. Юнгмейстер Д.А., Судариков С.М., Киреев К.А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 88–95.
6. Nautilus Minerals. 2023. URL: <http://www.nautilusminerals.com> (дата обращения: 02.09.2023).
7. Hong S., Kim H.W., Choi J.S. Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil // *The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*. Daejeon, Korea, 2002. P. 100–107.
8. Lipman A., Yu A. Subsea Mining // *Marine Technology Reporter*. 2019. P. 20–25.
9. Судариков С.М., Юнгмейстер Д.А., Королёв Р.И., Петров В.А. О возможности уменьшения техногенной нагрузки на придонные биоценозы при добыче твердых полезных ископаемых с использованием технических средств различной модификации // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 82–96.
10. Манипулятор для ROV. URL: <https://www.nauticexpo.ru/proizvoditel-sudno/manipulator-rov-26019.html?originalFilter=39374d3866572b79396a664f56764f4e556361777766d677a4e376156786e537537726a6a7a68526f464353506a4e2b4a45372b536d4956766557634276704d534c387132665873396b4e72546a307766445554745a6b4b756a716f5a627845706a6b64736e35616c61317a426a45366649534c63636859352f554e365a703561636864544c70645535724d582b7259464539635670725364756145684a71744b7773546c4863546f6f35762b4962337a337258772b5442494f7a547748504243624635584a39304c477554476d75424d62367870357744584b494872762b31536464764272664d5952336f554c31465379527559784b4d4770547a4e6b4e4a> (дата обращения: 24.12.2024).
11. Акинфиев Т.С., Бабицкий В.И., Крупенин В.Л. Манипуляционные системы резонансного типа // *Машиноведение*. 1982. № 1. С. 3–8.
12. Ribic A.I., Despotovic Z.V. High-Performance Feedback Control of Electromagnetic Vibratory Feeder // *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 2010. Vol. 57, Issue 9. P. 3087–3094.
13. Блехман И.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б. Энергетические характеристики вибрационных транспортных и технологических машин // *Материалы 14-й Междунар. конф. по проблемам вибрации: ICOVP 2019*. Сингапур: Springer, 2021. С. 29–46.
14. Gudushauri E.G., Chernyshev V.V. Resonant regimes of electromagnetic vibrators with strongly nonlinear position dependence of driving force // *Soviet machine science*. 1989. Iss. 4. P. 102–105.
15. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V. [et al]. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines // *Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proceedings of the 4-th International Conference*. Karlsruhe, Germany, 2001. P. 1005–1012.
16. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2013. № 1. С. 6–14.
17. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrillov A.E., Kalinin Ya.V., Sharonov N.G. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 // *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE: ASME 2016. 35-th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Busan, 2016. 9 p.
18. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Underwater tests of the walking robot MAK-1 // *Human-Centric Robotics – Proceedings of the 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2017*. Porto, 2018. P. 571–578.
19. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V., Sharonov N.G., Pryanichnikov V.E., Verzhinina I.P. Methods of engineering and experimental tests of walking crawlers moving on the seafloor // *OCEANS 2021*. San Diego, CA, 2021. 7 p.
20. Блехман И.И., Бутенин Н.В., Ганиев Р.Ф. [и др.]. Вибрации в технике: Справочник: в 6 томах. Т. 2. М.: Машиностроение, 1979. 351 с.

Для цитирования:

Чернышев В.В., Жога В.В., Шаронов Н.Г., Арыканцев В.В., Вершинина И.П., Коломин Н.В., Нелюбова А.В. ДИНАМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ГЛУБОКОВОДНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ // *Подводные исследования и робототехника*. 2025. № 1 (51). С. 19–28. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_51_01_02. EDN: .

Об авторах

ЧЕРНЫШЕВ Вадим Викторович, д.т.н., проф. кафедры динамики и прочности машин

Волгоградский государственный технический университет

Адрес: 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28

Научные интересы: мобильные роботы, шагающие машины, роботы передвигающиеся по дну, колебания механических систем

Тел.: 89608835725

E-mail: vad.chernyshev@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8687-8046

ЖОГА Виктор Викторович, д.ф.м.н., проф. кафедры динамики и прочности машин

Волгоградский государственный технический университет

Адрес: 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28

Научные интересы: мобильные роботы, динамика управляемого движения манипуляторов

E-mail: viczhoga@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8345-7385

ШАРОНОВ Николай Геннадьевич, к.т.н., зав. кафедрой динамики и прочности машин

Волгоградский государственный технический университет

Адрес: 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28

Научные интересы: динамика машин и роботов, роботы передвигающиеся по дну

E-mail: sharonov@vstu.ru

ORCID: 0000-0002-9894-707X

АРЫКАНЦЕВ Владимир Владимирович, инженер-конструктор

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматике им. Н.Л. Духова

Адрес: 28127030, Москва, Сушевская ул., д. 22

Научные интересы: динамика машин и роботов, роботы передвигающиеся по дну

E-mail: dtm@vstu.ru

ORCID: 0000-0002-9189-0090

ВЕРШИННИНА Ирина Петровна, к.т.н., доцент кафедры динамики и прочности машин

Волгоградский государственный технический университет

Адрес: 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28

Научные интересы: динамика машин и роботов

E-mail: i_vershinina@vstu.ru

ORCID: 0009-0006-3719-1682

КОЛОМИН Никита Вячеславович, аспирант

Волгоградский государственный технический университет

Адрес: 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28

Научные интересы: колебания электромеханических систем

E-mail: dtm@vstu.ru

ORCID: 0000-0001-6445-101X

НЕЛЮБОВА Анна Васильевна, аспирант

Волгоградский государственный технический университет

Адрес: 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28

Научные интересы: динамика управляемого движения манипуляторов

E-mail: dtm@vstu.ru

ORCID: 0009-0001-8825-8545



DYNAMIC AMPLIFICATION OF OSCILLATIONS IN THE ELECTRIC DRIVE OF DEEP-SEA MANIPULATORS BASED ON ELECTRIC MOTORS OF OSCILLATORY MOTION

V.V. Chernyshev, V.V. Zhoga, N.G. Sharonov, V.V. Arakantsev,
I.P. Vershinina, N.V. Kolomin, A.V. Nelyubova

Currently, technologies for the development of mineral resources of the world's oceans are being used with the help of robotic mining systems moving along the bottom. Underwater manipulators can be used to collect solid minerals dispersed along the seabed. High-speed manipulators are necessary for efficient operation. In manipulators, the speed of the links is limited by high energy consumption to overcome the forces of inertia in each cycle of movement. The purpose of the work is to study the dynamics of a high-speed manipulator based on electric motors of oscillatory motion of a resonant type. The resonant tuning ensures the recovery of energy spent on overcoming the forces of inertia. In deep-sea conditions, the electrical part of such a vibration drive can be easily isolated from the external environment. A simulation of the dynamics of the manipulator drive based on oscillatory motion electric motors with a rotary anchor is carried out. Lagrange-Maxwell equations were used in the development of the mathematical model of the drive. The simulation showed that due to the positional dependence of the electromagnetic driving torque, the electric motors in question cannot provide sufficiently large oscillation amplitudes. The possibility of amplification of oscillations by dynamic control methods was considered. It is shown that the amplification of vibrations can be achieved by introducing an additional degree of freedom into the electromechanical system "electric motor – actuator". It is proposed to connect the grip of the manipulator with the armature of the electric motor by means of an elastic element forming, together with the mass of the grip, an inertial dynamic vibration damper of the armature. Due to dynamic damping, the vibrational energy is redistributed from the armature to the actuator. As a result, the amplitude of the vibrations of the grip increases, and the amplitude of the vibrations of the armature, on the contrary, tends to zero. Moreover, it is possible to achieve dynamic stabilization of the armature oscillations in the zone with maximum values of the positional dependence of the driving electromagnetic moment. Numerical simulation has shown that in this way it is possible to increase the oscillation amplitude of the actuator tenfold.

Keywords: underwater robotic systems, robots moving along the bottom, resonant type manipulators, electric motors of oscillatory motion, vibrations of electromechanical systems, dynamic vibration control.

References

1. Andreev S.I., Cherkashev G.A. Mineral'nye resursy glubokovodnykh rajonov Mirovogo okeana: sostojanie problemy izucheniya i osvoeniya. Mineral'nye resursy Rossii. Jekonomika i upravlenie. 2018. No. 1. P. 10–15. [In Russ.]
2. Miller K.A., Thompson K.F., Johnston P., Santillo D. An Overview of Seabed Mining Including the Current State of Development, Environmental Impacts, and Knowledge Gaps. *Frontiers in Marine Science*. 2018. Vol. 4, No. JAN. P. 418.
3. Shherbatjuk A.F. Ob ispol'zovanii neobitaemykh podvodnykh apparatov pri osvoenii mestorozhdenij glubokovodnykh mineralov. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*. 2023. No. 2(44). P. 4–19. [In Russ.]
4. Gorshkov A.G. Tehnologicheskie voprosy osvoeniya metallosoderzhashchih poleznykh iskopaemykh Mirovogo Okeana. *Morskije informacionno-upravljajushhie sistemy*. 2019. No. 1. P. 54–73. [In Russ.]
5. Jungmeyster D.A., Sudarikov S.M., Kireev K.A. Obosnovanie tipov glubokovodnoj tehniki dlja dobychi morskikh zhelezomargancevykh konkcij. *Zapiski Gornogo instituta*. 2019. Vol. 235. P. 88–95. [In Russ.]
6. Nautilus Minerals. 2023. URL: <http://www.nautilusminerals.com> (date of access: 02.09.2023).
7. Hong S., Kim H.W., Choi J.S. Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil. *The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*. Daejeon, Korea, 2002. P. 100–107.
8. Lipman A., Yu A. Subsea Mining. *Marine Technology Reporter*. 2019. P. 20–25.
9. Sudarikov S.M., Jungmeyster D.A., Koroljov R.I., Petrov V.A. O vozmozhnosti umen'sheniya tehnogennoj nagruzki na pridonnye biocenozy pri dobyche tverdykh poleznykh iskopaemykh s ispol'zovaniem tehniceskikh sredstv razlichnoj modifikacii. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 253. P. 82–96. [In Russ.]
10. Manipuljator dlja ROV. URL: <https://www.nauticexpo.ru/proizvoditel-sudno/manipuljator-rov-26019.html?original->

Filter=39374d3866572b79396a664f56764f4e556361777766d-677a4e376156786e537537726a6a7a68526f464353506a4e-2b4a45372b536d4956766557634276704d534c387132665873396b4e72546a307766445554745a6b4b756a716f5a627845706a-6b64736e35616c61317a426a45366649534c63636859352f554e-365a703561636864544c70645535724d582b7259464539635670725364756145684a71744b7773546c4863546f6f35762b4962337a337258772b-5442494f7a547748504243624635584a39304c477554476d75424d62367870357744584b494872762b31536464764272664d5952336f-554c31465379527559784b4d4770547a4e6b4e4a (data obrashhenija: 24.12.2024). [In Russ.]

11. Akinfiev T.S., Babickij V.I., Krupenin V.L. Manipuljacionnye sistemy rezonansnogo tipa. Mashinovedenie. 1982. No. 1. P. 3–8. [In Russ.]

12. Ribic A.I., Despotovic Z.V. High-Performance Feedback Control of Electromagnetic Vibratory Feeder. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57, Issue 9. P. 3087–3094.

13. Blehman I.I., Vajsberg L.A., Vasil'kov V.B. Jenergeticheskie karakteristiki vibracionnyh transportnyh i tehnologicheskikh mashin. Materialy 14-j Mezhdunar. konf. po problemam vibracii: ICOVP 2019. Singapur: Springer, 2021. P. 29–46. [In Russ.]

14. Gudushauri E.G., Chernyshev V.V. Resonant regimes of electromagnetic vibrators with strongly nonlinear position dependence of driving force. Soviet machine science. 1989. Iss. 4. P. 102–105.

15. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V. [et al]. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines. Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proceedings of the 4-th International Conference. Karlsruhe, Germany, 2001. P. 1005–1012.

16. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G. Sravnitel'nyj analiz koljosnyh, gusenichnyh i shagajushhih mashin. Robototekhnika i tehničeskaja kibernetika. 2013. No. 1. P. 6–14. [In Russ.]

17. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrilov A.E., Kalinin Ya.V., Sharonov N.G. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE: ASME 2016. 35-th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Busan, 2016. 9 p.

18. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Underwater tests of the walking robot MAK-1. Human-Centric Robotics – Proceedings of the 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2017. Porto, 2018. P. 571–578.

19. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V., Sharonov N.G., Pryanichnikov V.E., Vershinina I.P. Methods of engineering and experimental tests of walking crawlers moving on the seafloor. OCEANS 2021. San Diego, CA, 2021. 7 p.

20. Blehman I.I., Butenin N.V., Ganiev R.F. [i dr.]. Vibracii v tehnike: Spravochnik: v 6 tomah. Vol. 2. M.: Mashinostroenie, 1979. 351 p. [In Russ.]

Information about the authors

CHERNYSHEV Vadim Victorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Dynamics and Strength of Machines

Volgograd State Technical University

Address: 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russia

Research interests: mobile robots, walking machines, robots moving along the bottom, vibrations of mechanical systems

Phone: 89608835725

E-mail: vad.chernyshev@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8687-8046

ZHOGA Victor Victorovich, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor of the Department of Dynamics and Strength of Machines

Volgograd State Technical University

Address: 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russia

Research interests: mobile robots, dynamics of controlled movement of manipulators

E-mail: viczhoga@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8345-7385

SHARONOV Nikolai Gennadevich, Ph.D, Head of the Department of Dynamics and Strength of Machines

Volgograd State Technical University

Address: 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russia

Research interests: dynamics of machines and robots, robots moving along the bottom

E-mail: sharonov@vstu.ru

ORCID: 0000-0002-9894-707X

ARAKANTSEV Vladimir Vladimirovich, Design engineer
Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA)

Address: 22 Sushchevskaya St., Moscow, 28127030, Russia

Research interests: dynamics of machines and robots, robots moving along the bottom

E-mail: dtm@vstu.ru

ORCID: 0000-0002-9189-0090

VERSHININA Irina Petrovna, Ph.D, Docent of the Department of Dynamics and Strength of Machines

Volgograd State Technical University

Address: 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russia

Research interests: dynamics of machines and robots

E-mail: i_vershinina@vstu.ru

ORCID: 0009-0006-3719-1682

KOLOMIN Nikita Vyacheslavovich, Postgraduate Student
Volgograd State Technical University

Address: 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russia

Research interests: Oscillations of electromechanical systems

E-mail: dtm@vstu.ru

ORCID: 0000-0001-6445-101X

NELYUBOVA Anna Vasilievna, Postgraduate Student
Volgograd State Technical University

Address: 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russia

Research interests: dynamics of controlled movement of manipulators

E-mail: dtm@vstu.ru

ORCID: 0009-0001-8825-8545

Recommended citation:

Chernyshev V.V., Zhoga V.V., Sharonov N.G., Arakantsev V.V., Vershinina I.P., Kolomin N.V., Nelyubova A.V. DYNAMIC AMPLIFICATION OF OSCILLATIONS IN THE ELECTRIC DRIVE OF DEEP-SEA MANIPULATORS BASED ON ELECTRIC MOTORS OF OSCILLATORY MOTION. Underwater investigations and robotics. 2025. No. 1 (51). P. 19–28. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_51_01_02. EDN: LQXASX.