

А.А. Омельчук, А.В. Рудакова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СПУСКА СУДНА НА ВОДУ С ПОМОЩЬЮ СЛИПА

Аннотация. В статье рассматривается анализ процессов спуска и подъема судов, осуществляемых с помощью сложной многоприводной системы типа слип. Аналитические зависимости для пространственного изменения параметров процесса спуска/подъема судна предлагается получать на основе использования функций принадлежности.

Ключевые слова: слип, аналитическая модель, спуск судна на воду, функции принадлежности, распределенные параметры.

Постановка проблемы. Из-за ряда объективных обстоятельств, многие отечественные судостроительные предприятия нуждаются в обновлении или ремонте подъемно-спусковых сооружений, в частности – слипов. Внедрение современной компьютеризированной системы управления открывает возможность снизить аварийность и повысить надежность процесса спуска/подъема судна на воду с помощью слипа без проведения капитального ремонта и дорогостоящего переоснащения спускового сооружения.

Анализ публикаций по теме исследования. В многомашинных объектах, когда электроприводы связаны через общий распределенный объект управления (в системе спуска/подъема судов группа тележек с приводными двигателями и удерживающими тросами объединена общей нагрузкой – корпусом судна), возникают сложные задачи управления согласованным движением с целью обеспечения синхронного движения тележек и равномерной нагрузки на их приводы [1, 2].

В течение спуска или подъема судна с помощью слипа судно устанавливается на специальные, так называемые косяковые тележки, которые передвигаются по рельсовым путям, расположенным на наклонной плоскости под углом 6° – 10° . Каждая судовозная тележка приводится в движение отдельным электроприводом с помощью

стального троса. Тележки имеют возможность независимо друг от друга двигаться по рельсам вниз (вверх), при этом основной задачей при спуске/подъеме судна является согласованное движение судовозных тележек с заданной скоростью. В процессе спуска судна судовозная тележка движется по рельсам по наклонной плоскости в двухфазной среде. Процесс спуска судна можно условно разбить на несколько этапов (рис. 1): движение тележки с ускорением до необходимой постоянной режимной скорости спуска, $l \in [0, l_1]$; движения тележки с постоянной скоростью до входа в воду, $l \in [l_1, l_2]$; переход тележки с надводной части слипа на подводную часть, $l \in [l_2, l_3]$; полное погружение тележки под воду, $l \in [l_3, l_4]$; движение тележки с постоянной скоростью в воде до всплытия судна, $l \in [l_4, l_5]$; всплытие судна и торможение тележки до полной остановки, $l \in [l_5, l_6]$.

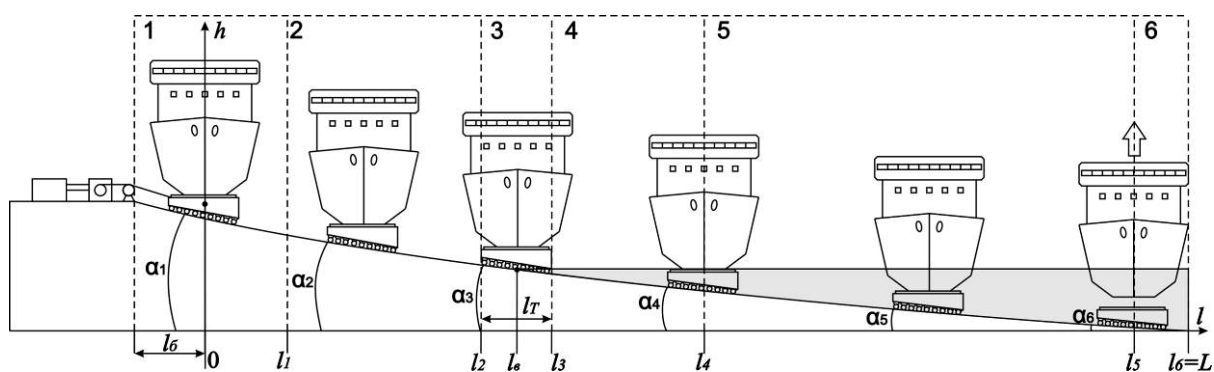


Рисунок 1 - Этапы спуска судна на воду с помощью слипа

Нештатные ситуации, возникающие при движении, связаны с нестабильностью нагрузки на электропривод. Во время движения в процессе спуска или подъема судна на сложный объект «судно-тележки» оказывают влияние группы случайных факторов [3]. Контроль параметров движения спусковой тележки (натяжения троса) должен осуществляться на протяжении всего пути $l \in [0, L]$. Основные силы, воздействующие на тележку на протяжении спуска, показаны на рис. 2.

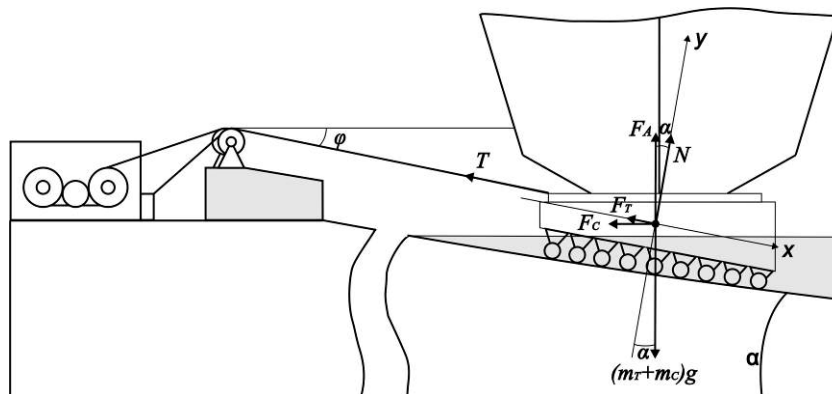


Рисунок 2 - Силы, воздействующие на тележку при спуске судна на воду

Исходя из соотношений, составленных на основе второго закона Ньютона, натяжение троса T можно выразить в виде [4]

$$T = \frac{((m_T + m_C)g - F_A) \cdot (\sin(\alpha) - \mu \cdot \cos(\alpha)) - F_C(\mu \cdot \sin(\alpha) + \cos(\alpha))}{\mu \cdot \sin(\phi - \alpha) - \cos(\phi - \alpha)}, (1)$$

где m_T – масса тележки; m_C – масса тележки; α – угол наклона слипа; T – натяжение троса; ϕ – угол наклона троса; F_T – сила трения; F_C – сила сопротивления воды; F_A – сила Архимеда; a – ускорение тележки; μ – коэффициент трения между колесами тележки и рельсами; N – сила реакции опоры.

Силы, действующие на тележку при движении в воде (сила Архимеда F_A и сила сопротивления со стороны воды F_C), определяются как

$$F_C = k_c \cdot S \frac{\rho v^2}{2}, F_A = \rho g V_n, (2)$$

где k_c – коэффициент сопротивления судна и тележки (для центральных секций судна можно принять $k_c=1$); $S = S_C + S_T$ – характерная площадь поверхности судна и тележки; v – скорость движения тележки; ρ – плотность воды; $V_n = V_C + V_T$ – объем судна и тележки, погруженный в воду. Исследования показали [3], что наиболее существенными факторами, влияющими на величину натяжения троса, а, следовательно, и на нагрузку привода судовозной тележки, являются коэффициент трения и массогабаритные характеристика судна.

Таким образом, выражение для натяжения троса (1) можно представить в упрощенной форме как:

$$T(l) = ((m_T + m_C)g - F_A(l)) \cdot (\sin \alpha - \mu(l) \cdot \cos \alpha). \quad (3)$$

Постановка задачи. Целью исследований является получение аналитических зависимостей для параметров, которые характеризуют процесс спуска и подъема судна с помощью слипа. Данные параметры изменяются в процессе работы слипа и могут быть использованы для формирования динамической модели перемещения судна по наклонным путям слипа.

Основная часть. Для формирования динамической модели спуска судна необходимо описывать силы натяжения тросов в зависимости от положения (в любой точке пути $l \in [0, L]$) в виде непрерывной функции $T(l)$.

На изменение силы натяжения троса в системе «электропривод-тележка» на всем протяжении пути существенно влияют: коэффициент трения μ , характерная площадь поверхности судна и тележки S , объем судна и тележки, погруженный в воду V .

1. Коэффициент трения.

Коэффициент трения при движении по суше или в воде имеет постоянные значения. Однако, при заходе тележки в воду (зона 3, см. рис.1) он плавно изменяется (рис. 3,а).

2. Характерная площадь.

Характерная площадь S влияет на силу сопротивления воды, и становится тем больше, чем глубже судно погружается в воду, а значит, зависит от протяженности слипа l и точки всплытия судна l_5 . На рис. 3,б показана зависимость S от l .

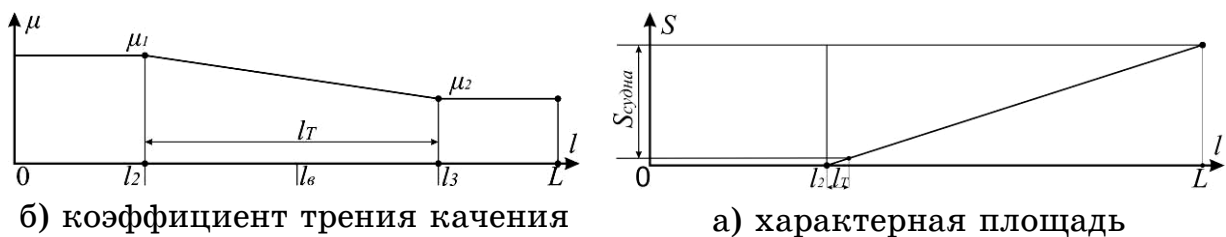


Рисунок 3 - Параметры погружения судовозной тележки в воду

3. Объем судна и тележки в воде.

На рис. 4,а показана секция судна и тележка при погружении под воду и зависимость общего погруженного объема V от l , где 1 – надводная часть судна, а 2 и 3 – это погруженная в воду часть судна и тележки соответственно. Зависимости V_T и V_C показаны на рис. 4,б.

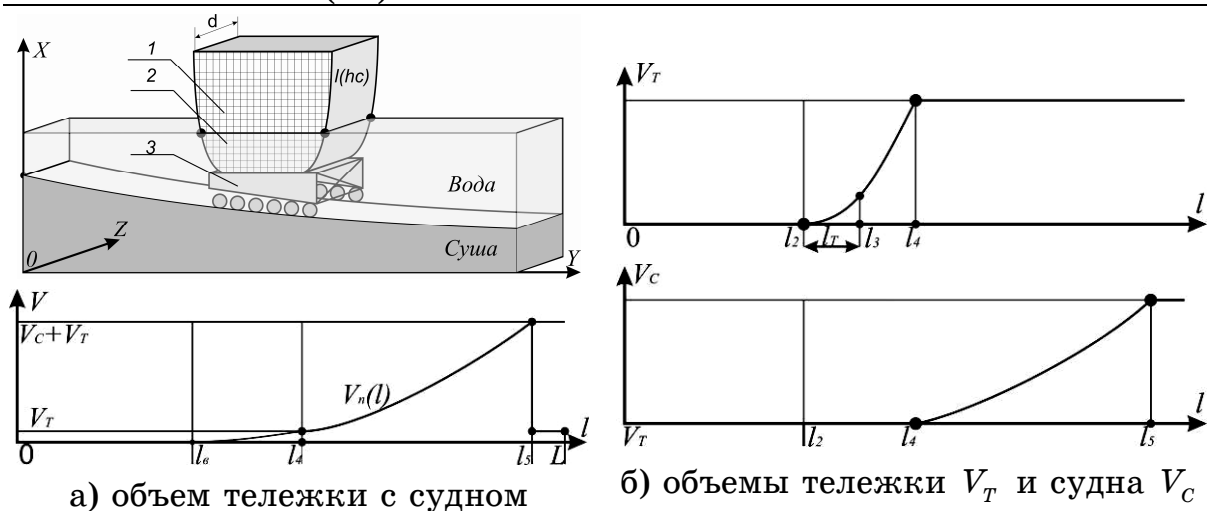


Рисунок 4 - Изменение подводного объема тел, погружаемых в воду

Изменение характеристик, которые влияют на величины сил действующих в системе «электропривод-тележка» на протяжении всего пути с некоторыми допущениями можно представить в виде:

– для коэффициента трения

$$\mu(l) = \begin{cases} \mu_1, & l \in [0, l_2], \\ \mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{(l - l_2)}{(l_3 - l_2)}, & l \in [l_2, l_3], \\ \mu_2, & l \in [l_3, L], \end{cases} \quad (4)$$

где μ_1 и μ_2 – коэффициенты трения в надводной и подводной части;

– для характерной площади и погруженного объема тележки

$$S_T(l) = \begin{cases} 0, & l \in [0, l_2], \\ S_{Tm} \frac{(l - l_2)}{(l_4 - l_2)}, & l \in [l_2, l_4], \\ S_{Tm}, & l \in [l_4, L], \end{cases} \quad \text{и} \quad V_T(l) = \begin{cases} 0, & l \in [0, l_2], \\ V_{Tm} \frac{(l - l_2)}{(l_4 - l_2)}, & l \in [l_2, l_4], \\ V_{Tm}, & l \in [l_4, L], \end{cases} \quad (5)$$

где S_{Tm} и V_{Tm} – максимальные значения характерной площади и объема тележки;

– для характерной площади и погруженного объема судна

$$S_C(l) = \begin{cases} 0, & l \in [0, l_4], \\ S_{Cm} \frac{(l - l_4)}{(l_5 - l_4)}, & l \in [l_4, l_5], \\ S_{Cm}, & l \in [l_5, L], \end{cases} \quad \text{и} \quad V_C(l) = \begin{cases} 0, & l \in [0, l_4], \\ V_{Cm} \frac{(l - l_4)}{(l_5 - l_4)}, & l \in [l_4, l_5], \\ V_{Cm}, & l \in [l_5, L], \end{cases} \quad (6)$$

где S_{Cm} и V_{Cm} – максимальные значения характерной площади и объема погруженной в воду части судна (до всплытия).

На основе предложенного подхода, используя функции принадлежности, можно получить аналитические зависимости для непрерывного описания параметров (4–6) в виде функции от пространственной координаты l . Для формирования аналитических зависимостей $\mu(l)$, $S_T(l)$, $V_T(l)$, $S_C(l)$ и $V_C(l)$ от пройденного пути можно использовать z- и s-подобные сигмоидные функции принадлежности [5], которые приводят к выражениям вида:

– для коэффициента трения

$$\mu(l) = \mu_2 + (\mu_1 - \mu_2) \frac{1}{1 + e^{\delta_{23}(l-l_{23})}}, \quad (7)$$

где $l_{23} = (l_2 + l_3) / 2$ – середина отрезка $[l_2, l_3]$; δ_{23} – коэффициент крутизны для переходного участка $\Delta_{23} = (l_3 - l_2) / 2$;

– для характерной площади и погруженного объема тележки

$$S_T(l) = S_{Tm} \frac{1}{1 + e^{-\delta_{24}(l-l_{24})}} \text{ и } V_T(l) = V_{Tm} \frac{1}{1 + e^{-\delta_{24}(l-l_{24})}}, \quad (8)$$

где $l_{24} = (l_2 + l_4) / 2$ – середина отрезка $[l_2, l_4]$; δ_{24} – коэффициент крутизны для переходного участка $\Delta_{24} = (l_4 - l_2) / 2$;

– для характерной площади и погруженного объема судна

$$S_C(l) = S_{Cm} \frac{1}{1 + e^{-\delta_{45}(l-l_{45})}} \text{ и } V_C(l) = V_{Cm} \frac{1}{1 + e^{-\delta_{45}(l-l_{45})}}, \quad (9)$$

где $l_{45} = (l_4 + l_5) / 2$ – середина отрезка $[l_4, l_5]$; δ_{45} – коэффициент крутизны, для переходного участка $\Delta_{45} = (l_5 - l_4) / 2$;

Моделирование пространственно изменяющихся параметров осуществлялось при следующих исходных данных: $l_1 = 0\text{ м}$, $l_2 = 17.5\text{ м}$, $l_3 = 23\text{ м}$, $l_4 = 43\text{ м}$, $l_5 = 58\text{ м}$, $l_6 = 70\text{ м}$, $S_{Tm} = 0.33\text{ м}^2$, $V_{Tm} = 3\text{ м}^3$, $S_{Cm} = 13.8\text{ м}^2$, $V_{Cm} = 238.6\text{ м}^3$, $\varepsilon = 0.05$. Полученные аналитические зависимости для пространственно изменяющихся параметров по выражениям (7)–(9) (сплошная линия) приведено на рис.5–рис.7. Штрихпунктирной линией изображены исходные зависимости, построенные согласно выражениям (4)–(6).

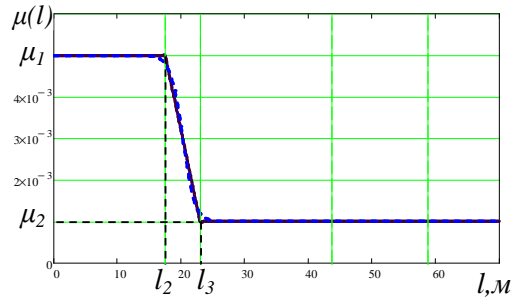
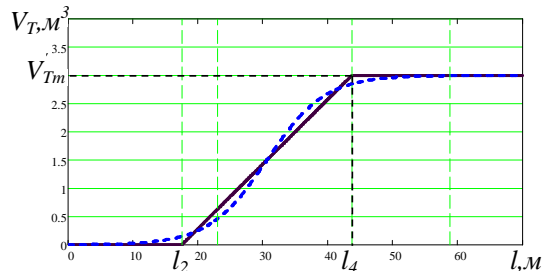
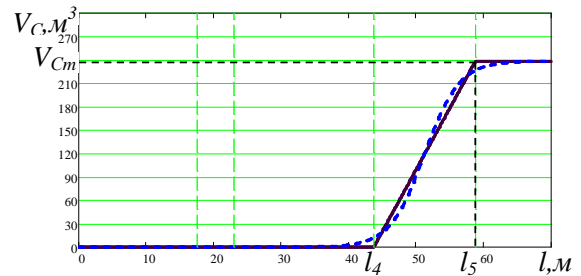


Рисунок 5 - Коэффициент трения

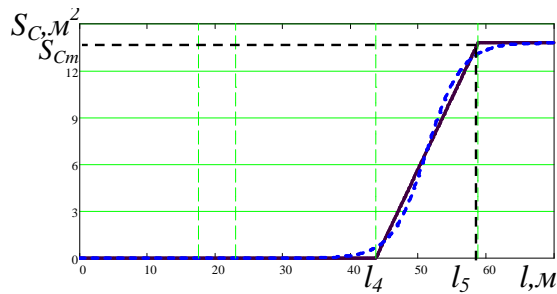


а) тележки

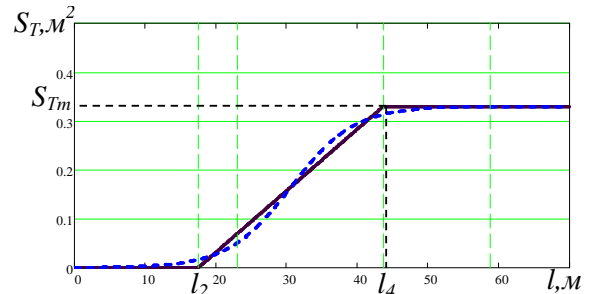


б) судна

Рисунок 6 - Погруженные объемы



а) тележки



б) судна

Рисунок 7 - Характерные площади

Результаты моделирования натяжения троса, в зависимости от местоположения судна при движении в процессе спуска и подъема, при различных возможных значениях коэффициента трения (в зависимости от состояния рельс) и веса судна показаны на рис. 8 - рис. 10.

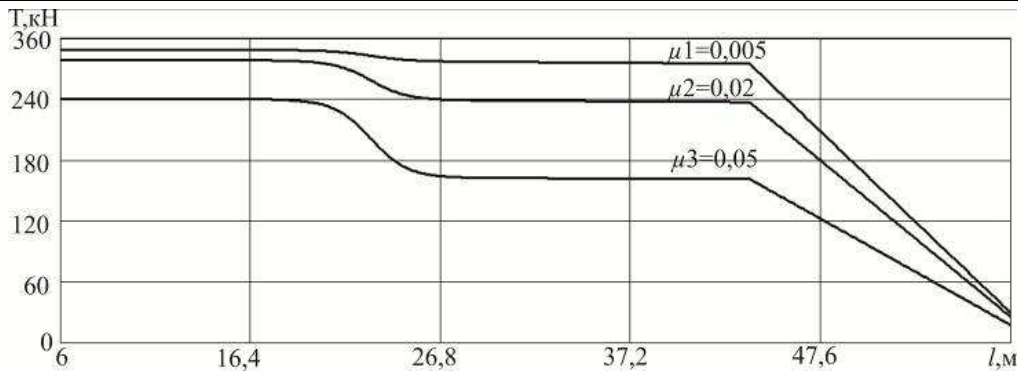


Рисунок 8 - Влияние коэффициента трения на натяжение троса

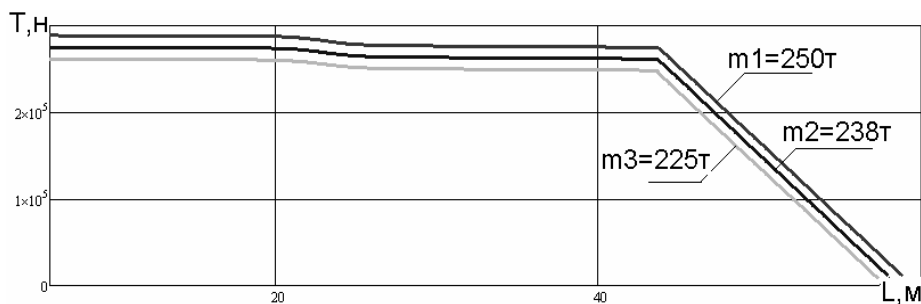


Рисунок 9 - Влияние распределения веса судна на натяжение троса

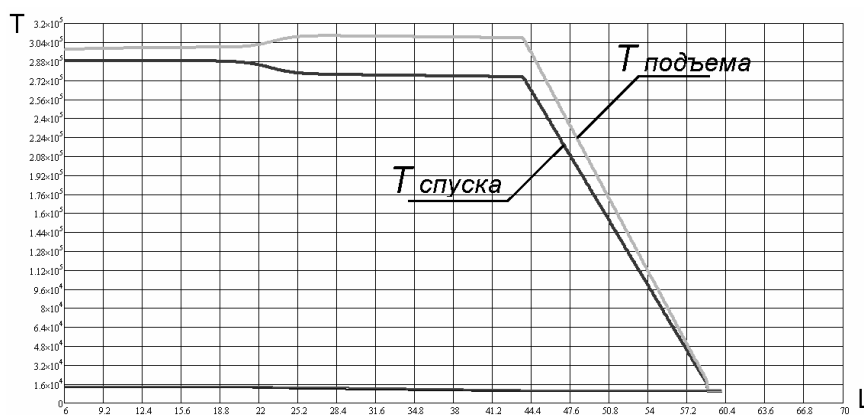


Рисунок 10 - Влияние режима работы слипа на натяжение троса

По представленным графикам можно судить о характере изменения нагрузки на отдельные приводы слипа. На протяжении всего пути фиксируются диапазоны изменения нагрузки по отношению к максимальной нагрузке в зависимости от трения – 45%, от массы секции судна – 10%, от режима работы (спуска или подъема) – 10%. Участки резкого изменения характеристик соответствуют отрезкам

пути, на которых чаще всего наблюдаются нештатные режимы работы слипа.

Выводы. Полученные аналитические зависимости основных параметров, существенно влияют на процесс спуска/подъема связанного объекта «судно-тележки», позволяющие моделировать изменение нагрузки на все электроприводы слипа в любой точке движения.

Наличие аналитического описания пространственно изменяющихся параметров позволяет построить динамическую модель, описывающую движение тележек с установленным на них судном на протяжении всего пути.

Создание такой модели необходимо для разработки методов согласованного управления электроприводами поперечного слипа, с помощью которых можно обеспечить соответствующую надежность функционирования сложной электромеханической системы в течение всего процесса спуска/подъема судна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пиляев С.И. Судоподъемные и судоспускные сооружения / С.И. Пиляев, Ф.В. Морозов. – М.: МИСИ, 1993. – 107 с.
2. Омельчук, А. А. Проблеми узгодженого управління складною електромеханічною системою / Ю. О. Лебеденко, Г. В. Рудакова // Наукові праці НУХТ.- 2013. – №49. – С.19– 23.
3. Омельчук А.А. Информационно-измерительная подсистема мониторинга параметров и процессов спуска судна на воду / А.А. Омельчук, А.В.Рудакова // Збірник наукових праць НУК. – 2013.– №4(449). – С. 11 – 16.
4. Омельчук А.А. Моделирование движения спусковых тележек слипа / А.А. Омельчук, Ю.А. Лебеденко, А.В. Рудакова // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2(47). – Херсон: ХНТУ, 2013. – С. 265 – 270.
5. Шейник С.П. Использование функций принадлежности для моделирования параметров распределенных объектов / С.П. Шейник, А.В.Рудакова // ААЕКС. – 2009. - №2. С. 20-26.