

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА С РЕЛЕЙНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГРУЗОВОЙ ЛЕБЕДКЕ КРАНА

INVESTIGATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF VOLUMETRIC HYDRAULIC DRIVE WITH RELAY CONTROL AS APPLIED TO THE CARGO WINCH CRANE

Заярный С.Л., Баранов К.А.
Zayarny S.L., Baranov K.A.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана «Национальный исследовательский университет», Калужский филиал (Калуга, Россия)
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Kaluga branch (Kaluga, Russian Federation)

Аннотация. Рассмотрены и проанализированы известные варианты объемных гидроприводов грузоподъемных и технологических механизмов. Рассмотрены области применения насосных и аккумуляторных гидроприводов, с различными видами регулирования, и варианты их реализации в качестве приводов грузовой лебедки мостового крана. Показано, что управление работой объемного гидравлического приводов грузовой лебедки, наряду с объемным и дроссельным регулированием, может быть выполнено релейным способом. Отмечено, что цикличность работы грузоподъемных механизмов при подъеме и опускания груза, позволяет осуществить механическую и гидравлическую рекуперация энергии, в пределах рабочего цикла, что является перспективным способом существенного повышением эффективности их работы. Проведен анализ существующих конструкций гидравлических приводов технологических машин, позволяющих рекуперировать потенциальную энергию рабочих органов с грузом. Предложен в качестве альтернативы известным гидроприводам грузовой лебедки мостового крана, гидропривод с релейным управлением. Показана эффективность такого привода, по показателям коэффициента использования номинального давления и энергоемкости рабочей жидкости, в случае реализации в нем механической и гидравлический рекуперации энергии в рабочем цикле. Рассмотрена механическая и гидравлическая схемы такого привода. Предложен алгоритм математической модели его работы с рассмотрением различных фаз движения груза и проведено ее исследование. Проанализирована возможность выполнение условий безопасности работы гидропривод с релейным управлением, в части обеспечения требований к равномерности движения груза.

Abstract. The known variants of volumetric hydraulic drives of lifting and technological mechanisms are considered and analyzed. The areas of application of pumping and accumulator hydraulic drives, with various types of regulation, and options for their implementation as drives of a cargo winch of a bridge crane are considered. It is shown that the operation of the volumetric hydraulic drives of the cargo winch, along with volumetric and throttle control, can be performed by a relay method. It is noted that the cyclical operation of lifting mechanisms during lifting and lowering of cargo allows for mechanical and hydraulic energy recovery within the working cycle, which is a promising way to significantly increase the efficiency of their work. The analysis of the existing designs of hydraulic drives of technological machines, allowing to recover the potential energy of working bodies with cargo, is carried out. It is proposed as an alternative to the known hydraulic drives of the cargo winch of the bridge crane, a hydraulic drive with relay control. The efficiency of such a drive is shown, according to the indicators of the nominal pressure utilization coefficient and the energy intensity of the working fluid, in the case of the implementation of mechanical and hydraulic energy recovery in the working cycle in it. The mechanical and hydraulic circuits of such a drive are examined. An algorithm of mathematical model of its operation with consideration of different phases of cargo movement is proposed and its investigation is carried out. The possibility of fulfilling the safety conditions of operation of a hydraulic drive with relay control, in terms of ensuring the requirements for the uniformity of cargo movement, is analyzed.

Ключевые слова: грузовая лебедка, объемный гидропривод, релейное управление, рекуперация.

Дата получения статьи: 10.12.2023
Дата принятия к публикации: 11.03.2024
Дата публикации: 25.06.2024

Сведения об авторах:

Заярный Сергей Леонидович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы» Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»,
e-mail: texnakon@yandex.ru.

Баранов Кирилл Александрович – студент кафедры «Подъемно-транспортные системы» Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», *e-mail: kir.aaa@yandex.ru.*

Keywords: cargo winch, volumetric hydraulic drive, relay control, recovery.

Date of manuscript reception: 10.12.2023
Date of acceptance for publication: 11.03.2024
Date of publication: 25.06.2024

Authors' information:

Sergey L. Zayarny – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department «Lifting and transport systems» at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, *e-mail: texnakon@yandex.ru.*

Kirill A. Baranov – student of Department «Lifting and transport systems» at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University,
e-mail: kir.aaa@yandex.ru.

1. Введение

Объемные гидроприводы широко используются в дорожных, строительных и специальных грузоподъемных машинах [1 - 3]. Их применение объясняется рядом преимуществ, к которым относятся [4,5]:

- простота управления;
- возможность плавного разгона;
- бесступенчатое регулирование передаточного числа в широком диапазоне;
- возможность создания больших передаточных отношений;
- малая удельная масса (0,2...0,3 кг/кВт).

В качестве основных способов регулирования объемных гидроприводов применяются дроссельное и объемное регулирование. В некоторых случаях регулирование производится изменением скорости приводящего двигателя.

Большая группа различных машин и технологического оборудования с объемным гидроприводом при перемещении выходного звена реализуют в процессе своей работы только две функции: изменение направления перемещения; фиксацию конечного положения. Это существенно снижает требования к их регулированию, которое может быть обеспечено релейным способом [6, 7].

Особенности функционирования объемного привода грузовой лебедки крана также позволяют рассмотреть релейный вариант его управления. Исследованию математиче-

ской модели объемного гидропривода с релейным управлением применительно к грузовой лебедке крана с учетом особенностей его функционирования посвящена настоящая статья.

2. Особенности функционирования объемного гидропривода

Работа крана может происходить по различным технологическим схемам, моделируемым характерными технологическими циклами, которые формируются на основании анализа грузопотоков и размещения оборудования в зоне работы крана на различных производствах [8 - 10].

Работу механизма подъема грузовой лебедки крана можно определить тремя характерными режимами:

- работа с продолжительной постоянной нагрузкой в течении значительного времени, соизмеримым с временем нагрева двигателя;
- работа с кратковременной нагрузкой, при которой время ожидания несоизмеримо больше времени работы под нагрузкой;
- работа с повторно-кратковременной нагрузкой с чередованием соизмеримых во времени периодов работы под нагрузкой и ожидания.

Одной из характеристик характерного технологического цикла является коэффициент распределения значений его параметров:

$$K_k = \sum_{j=1}^n \mu_j \sum_{i=1}^m \tilde{c}_i \bar{P}_{k,i,j}, \quad (1)$$

где \tilde{c}_i – относительное число циклов работы; $\bar{P}_{k,i,j}$ – k -й параметр с i -м относительным значением в j -ом характерном технологическом цикле; μ_j – весовой коэффициент характерного технологического цикла при условии $\sum_{j=1}^n \mu_j = 1$.

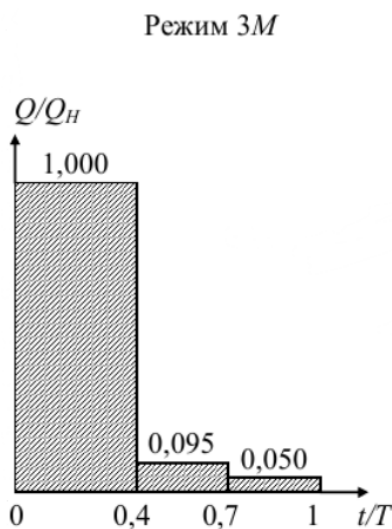


Рис. 1. Гистограмма нагружений механизма подъема крана.

Работа механизма подъема грузовой тележки крана определяется чередованием подъема и опускания груза с большими энергетическими затратами привода и потерей потенциальной энергии положения груза при его опускании. По данным ВНИИП-ТМАШа [11], приведенным на рис. 1, максимальный груз краном поднимается только в 40% случаев.

При существенно неравномерной нагрузке механизма подъема крана рекуперация энергии положения и движения груза в форме гидростатической энергии или накопителя механической энергии системой маховиков является перспективным способом повышением эффективности его работы.

В [12] проведен анализ существующих конструкций гидропривода портовых кранов, гидравлических экскаваторов и погрузчиков, позволяющих рекуперировать потен-

циальную энергию рабочих органов с грузом в форме гидростатической энергии.

В [13 - 15] рассматривается вариант рекуперации механической энергии в импульсном бесступенчатом приводе системой маховиков и представлен анализ его динамических характеристик применительно к современной малогабаритной транспортной технике. Особенностью такого метода является неизменность формы энергии при ее трансформации.

Применение импульсных передач на транспортных средствах повышает их эффективность [16], а именно:

- устраняет необходимость в дополнительной коробке передач за счет более широкого диапазона трансформации момента;
- обеспечивает постоянный полный привод без циркуляции паразитной мощности с автоматической компенсацией кинематического несоответствия;
- повышает маневренность и проходимость за счет внутренней автоматичности импульсной передачи (саморегулирования передаточного отношения);
- упрощает и удешевляет трансмиссию за счет применения простой конструкции, реализуемой на доступном технологическом уровне.

Преимущества импульсного привода реализуются и в случае предлагаемого авторами импульсного гидропривода с механическим рекуператором энергии применительно к механизму подъема грузовой лебедки крана. Регулирование такого привода обеспечивается релейным управлением, частотой чередования рабочих импульсов движущего момента гидромотора. В случае аккумуляторного привода время ожидания в пределах характерного технологического цикла может быть использовано на зарядку питающего аккумулятора, а в случае опускания груза, при котором гидромотор работает в режиме гидронасоса, может быть включен режим гидравлической рекуперации энергии положения груза.

Необратимые потери, возникающие в системе импульсного гидропривода, компенсируются внешним источником небольшой мощности, не более 10% мощности привода,

состоящим из вспомогательного гидронасоса постоянного объема с электроприводом.

3. Функционирование объемного гидропривода с релейным управлением

Принципиальная гидравлическая схема объемного привода с релейным управлением показана на рис. 2. Управляющий сигнал смещает гидрораспределитель 6 в левую позицию. При этом гидроцилиндр 7 смещается вправо, а рабочая жидкость из его штоковой полости через путевой гидрораспределитель 8, распределитель 6 и подпорный клапан 10 вытесняется в бак 1. После перемещения штока гидроцилиндра 7 в крайнее положение гидропривод выключается путевым гидрораспределителем 8, запирающим штоковую полость гидроцилиндра 7. При отсутствии управляющего сигнала гидрораспределитель 6 устанавливается в среднюю позицию, запирая полости гидроцилиндра 7. Реверсирование выходного звена гидропривода выполняется после поступления управляющего сигнала на гидрораспределитель 6, смещая его в правую позицию, после чего рабочая жидкость через обратный клапан 9 поступает в штоковую полость гидроцилиндра 7, вытесняя рабочую жидкость из его поршневой полости, через гидрораспределитель 6 и подпорный клапан 10 в бак 1. Равновесные скорости штока гидроцилиндра 7 при его прямом и обратном ходе устанавливаются настройкой подпорного клапана 10.

В зависимости от цикличности управляющего сигнала и настройки подпорного клапана 10 тахограммы движения выходного звена двухпозиционного привода при релейном управлении могут различаться по форме, в частности: треугольной, прямоугольной, трапецеидальной.

В этом случае рассматриваемый привод приобретает свойства импульсных передач со всеми ее характерными преимуществами и особенностями.

4. Схемы привода грузовой лебедки крана

Рассмотрим предлагаемый авторами привод грузовой лебедки крана, состоящий из

взаимодействующих между собой гидравлической и механической частей.

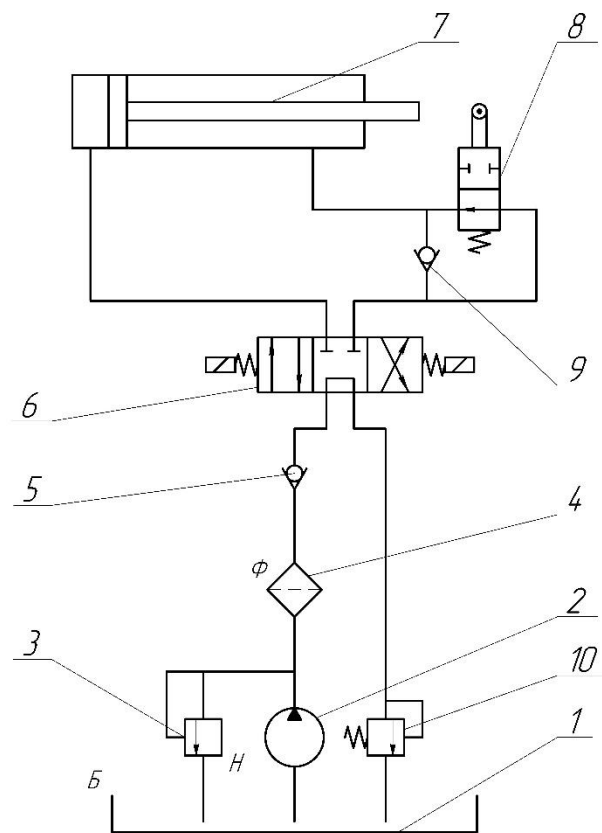


Рис. 2. Принципиальная схема гидропривода с релейным управлением:
1 - бак; 2 - нерегулируемый насос;
3 - предохранительный клапан;
4 - фильтр; 5 - обратный клапан;
8 - трёхпозиционный четырехлинейный гидрораспределитель; 7 - гидроцилиндр;
8 - путевой гидрораспределитель;
9 - обратный клапан; 10-подпорный клапан

В качестве гидравлической части привода грузовой лебедки, работа которого характеризуются кратковременными рабочими циклами с их ограниченным числом, рассмотрим объемный аккумуляторный гидропривод с релейным управлением, представленном на рис. 3.

Объем гидравлической энергии аккумуляторного гидропривода определяется параметрами зарядки гидравлического рекуператора 10, обеспечивающего работу приводного гидромотора 2. Пополнение периодически

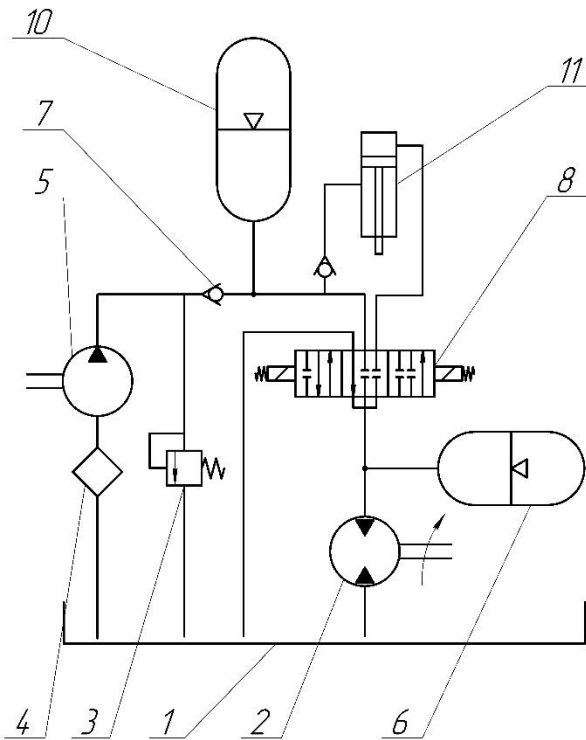


Рис. 3. Схема гидравлического привода:
1 – гидробак; 2 – гидромотор; 3 – клапан предохранительный; 4 – фильтр;
5 – гидронасос; 6 – гидравлический демпфер; 7 – клапан обратный;
8 – гидрораспределитель;
10 – гидравлический рекуператор;
11 – механический рекуператор

расходуемой гидравлической энергии гидравлического рекуператора обеспечивается питающим гидронасосом 5, параметры и периодичность включения которого определяются потенциальной энергией положения груза. Особенностью рассматриваемой системы является существенно большая номинальная мощность приводного гидромотора 2, работающего в кратковременном режиме, по сравнению с мощностью питающего гидронасоса 5, работающего в длительном режиме. В пределах цикла релейного управления гидроприводом грузовой лебедки при отсутствии управляющего сигнала гидрораспределитель 8 находится в среднем положении. При этом гидравлический рекуператор 10 заряжается, а приводной гидромотор 2 подпитывается от бака 1, что соответствует работе гидропривода в фазе «выбег». После поступления управляющего сигнала, гидрораспределитель 8 переключается в левую по-

зицию, соединяя напорную линию от пневмогидравлического аккумулятора 10 с приводным гидромотором 2, что соответствует работе гидропривода в фазе «разгон». При этом обеспечивается ускоренное движение механического привода до заданной скорости v_{\max} , а гидравлический демпфер 6 заряжается, снижая динамические нагрузки в приводе. При достижении заданной скорости управляющий сигнал прерывается, гидрораспределитель 8 возвращается в среднее положение, питающий пневмогидравлический аккумулятор 10 заряжается, а демпфирующий гидравлический аккумулятор 6 разряжается, исключая разрыв потока и снижая динамические нагрузки в приводе, приводной гидромотор 2 подпитывается от бака 1, что соответствует его работе в фазе «выбег». При достижении заданной скорости v_{\min} и поступлении управляющего сигнала рабочий цикл повторяется.

В режиме опускания груза после поступления управляющего сигнала гидрораспределитель 8 переключается в правую позицию, соединяя напорную линию поршневой полостью мультипликатора 11 с приводным гидромотором 2, работающим в реверсивном режиме, что соответствует его работе в фазе «торможение».

Механическая часть привода грузовой лебедки крана, схема которой представлена на рис. 4, является абсолютно жесткой динамической системой, функционирование которой определяется взаимодействиями $M_{\text{об}} \leftrightarrow (J_r + J_{\text{м.п.}}^{\text{np}}) \leftrightarrow M_G$. Значения $M_{\text{об}}$ изменяются дискретно, что определяет рассматриваемую динамическую систему как импульсную динамическую с абсолютно жесткими связями.

5. Моделирование и анализ движения груза в рабочем цикле

Переходные процессы, возникающие в приводе при движении с чередующимися постоянными скоростями, проанализированы в [17]. Рассматриваемый привод работает по циклической схеме: разгон и замедление

до заданных скоростей v_{\max} ; v_{\min} . Его динамическая характеристика формируется во взаимодействие гидравлической и механической частей, в режимах подъема и опускания груза.

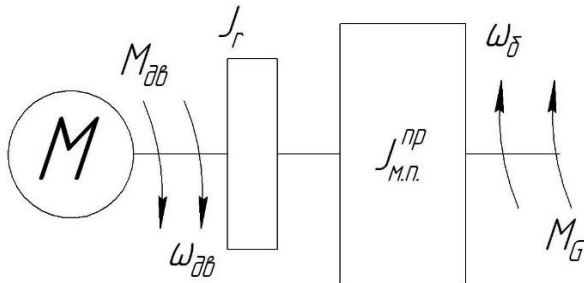


Рис.4. Схема механизма подъема с механической рекуперацией энергии: M - приводной гидромотор; $M_{\text{дв}}$ - движущий момент гидромотора; $\omega_{\text{дв}}$ - угловая скорость двигателя; I_r - момент инерции маховика - рекуператора; $I_{\text{м.п.}}^{\text{пр}}$ - приведенный моменты инерции механизма подъема, включая момент инерции груза; M_G - грузовой момент; ω_g - угловые скорости грузового барабана.

При перемещении груза в режиме подъема целесообразно рассмотреть две фазы.

Фаза 1 «разгон», временной промежуток Δt_1 . Движение элементов привода будет равноускоренным и при неизменной величине $M_{\text{дв}}$ определится условием

$$M_{\text{дв}} - M_r(\omega) - M_{\text{м.п.}}(\omega) - M_{\text{npG}} = 0, \quad (2)$$

где $M_r(\omega) = I_r \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ - инерционный момент при равноускоренном движении маховика - рекуператора в промежутке времени Δt ; $M_{\text{м.п.}}(\omega) = I_{\text{м.п.}}^{\text{пр}} \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ - инерционный момент при равноускоренном движении привода и груза в промежутке времени Δt ; M_{npG} - приведенный статический момент груза.

Приращение угловой скорости за промежуток Δt_1 с учетом I_r и $I_{\text{м.п.}}^{\text{пр}}$ составит

$$v_{G\min} \rightarrow v_{G\max}; \Delta\omega_1 = \frac{M_{\text{дв}} - M_{\text{npG}}}{I_r} \Delta t_1,$$

а временной промежуток Δt_1 определится из соотношения

$$\Delta t_1 = \frac{I_r}{M_{\text{дв}} - M_{\text{npG}}} \Delta\omega_1. \quad (3)$$

Фаза 2 «выбег», временной промежуток Δt_2 . Движение элементов привода будет равнозамедленным при $M_{\text{дв}} = 0$ и определится условием

$$M_r(\omega) - M_{\text{npG}} = 0 \quad (4)$$

Изменение угловой скорости за промежуток Δt_2 составит

$$v_{G\max} \rightarrow v_{G\min}; \Delta\omega_2 = \frac{M_{\text{npG}}}{I_r} \Delta t_2,$$

а временной промежуток Δt_2 определится из соотношения

$$\Delta t_2 = \frac{I_r}{M_{\text{npG}}} \Delta\omega_2. \quad (5)$$

Условия перехода фаз движений привода:

- от фазы 1 к фазе 2 $\omega_1 = \omega_{\max}$;

- от фазы 2 к фазе 1 $\omega_2 = \omega_{\min}$.

При движении механизма подъема груза, необходимо выполнение условия:

$$M_{\text{дв}} \geq M_{\text{npG}} \quad (6)$$

где $M_{\text{npG}} = \frac{Gr_g}{i_m a \eta_m}$ [Н·м] - приведенный к

валу гидромотора грузовой момент;

$M_{\text{дв}} = \frac{V_{0\text{гм}} P_{2\text{м}} \min \eta_{2\text{м}}}{2\pi}$ [Н·м] - момент гидро-

мотора [4]; G - вес груза, [Н]; r_g - радиус

грузового барабана, м; i_m - передаточное

число механической передачи; a - кратность

полиспада грузовой подвески; $V_{0\text{гм}}$ - объем

гидромотора, мм³; $\eta_{2\text{м}}, \eta_m$ - коэффициент полезного действия гидромотора и механической передачи, включая канатную систему;

$P_{2\text{м}} \min$ - минимальное давление в гидравлической системе привода.

Здесь условие «равно» определяет равномерное движение груза, а условие «больше» его равноускоренное движение.

С учетом (6) объем гидромотора определяется из соотношения

$$V_{0z\mu} = \frac{2\pi r_{\delta} k_V}{i_m a} \left(\frac{G_{\max}}{P_{z\mu \min} \eta_{z\mu}} \right) 10^3,$$

или

$$V_{0z\mu} = \frac{v_{G\max} k_V}{n_{z\delta \max}} \left(\frac{G_{\max}}{P_{z\mu \min} \eta_{z\delta}} \right) 10^3, \quad (7)$$

где v_G - скорость подъема груза, м/с; $n_{\delta\omega}$ - скорость вращения вала двигателя, об/с; $k_V = 1, 2, \dots, 1, 4$ - коэффициент запаса (определяет динамические характеристики привода и условие обеспечения равноускоренного движения груза).

Изменение рабочего гидравлического давления в системе $p_i(v_i)$ определяется линейной характеристикой гидравлического аккумулятора в виде:

$$0,3 p_{\max} \leq p_i(v_i) \leq p_{\max} \left(1 - \frac{\Delta v_i}{v_a} \right), \quad (8)$$

где: Δv_i - текущий расход аккумулятора; v_a - рабочий объем аккумулятора.

Соотношения (2) - (8) определяют математическую модель работы грузовой лебедки крана с объемным гидроприводом при его релейным управлении. Реализация этой модели была выполнена в среде LabVIEW с использованием алгоритмов, приведенных в [18, 19]. Расчетные значения параметров тахограмм первой и второй фаз перемещения груза, а также высоты его подъема приведены в табл. 1 - 3. Принято: $v_{\max} = 0,2 \text{ м/с}$, $v_{\min} = 0,1 \text{ м/с}$, $i_m = 50$, $a = 4$, $k_V = 1,4$. Варьируемыми параметрами являются I_r , v_a и G . Параметры маховика-рекуператора выбраны по данным [14].

Таблица 1

Расчетные значения тахограмм первой фазы перемещения груза

Итерация	1	2	3	6	8	10	11	15	16	17	21	25
$I_r = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; v_a = 20 \text{ л}; G = 10000 \text{ Н}$												
$\Delta t_{1,c}$	1,17	1,29	1,44	2,37	2,53	2,71	2,82	3,43	3,66	3,94		
$\Delta h_{1i}, \text{м}$	0,18	0,19	0,22	0,36	0,38	0,41	0,42	0,52	0,55	0,59		
$P_{z\mu}, \text{МПа}$	32,00	29,18	26,09	16,13	15,21	14,22	13,70	11,37	10,71	10,00		
$I_r = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; v_a = 20 \text{ л}; G = 80000 \text{ Н}$												
$\Delta t_{1,c}$	1,38	1,58	1,89	3,66	4,29	5,38	6,34					
$\Delta h_{1i}, \text{м}$	0,21	0,24	0,28	0,55	0,64	0,81	0,95					
$P_{z\mu}, \text{МПа}$	32,00	28,67	24,86	15,53	14,06	12,33	11,29					
$I_r = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; v_a = 30 \text{ л}; G = 10000 \text{ Н}$												
$\Delta t_{1,c}$	1,17	1,25	1,34	1,80	2,36	2,46	2,51	2,76	2,84	2,92	3,34	
$\Delta h_{1i}, \text{м}$	0,18	0,19	0,20	0,27	0,35	0,37	0,38	0,41	0,43	0,44	0,50	
$P_{z\mu}, \text{МПа}$	32,00	30,12	28,12	21,10	16,23	15,62	15,30	13,97	13,62	13,25	11,68	
$I_r = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; v_a = 30 \text{ л}; G = 80000 \text{ Н}$												
$\Delta t_{1,c}$	1,38	1,51	1,68	2,95	3,61	3,99	4,22	5,86	6,66	7,88		
$\Delta h_{1i}, \text{м}$	0,21	0,23	0,25	0,44	0,54	0,60	0,63	0,88	1,00	1,18		
$P_{z\mu}, \text{МПа}$	32,00	29,78	27,36	17,94	15,65	14,70	14,19	11,77	11,02	10,16		

$I_r = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; v_a = 20 \text{ л}; G = 10000 \text{ Н}$										
$\Delta t_{1, \text{с}}$	1,95	2,30	2,90	4,37	4,99	5,96	6,71			
$\Delta h_{1i, \text{м}}$	0,29	0,34	0,43	0,66	0,75	0,89	1,01			
$p_{2M}, \text{МПа}$	32,00	27,31	21,78	14,67	12,94	10,94	9,79			
$I_r = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; v_a = 20 \text{ л}; G = 80000 \text{ Н}$										
$\Delta t_{1, \text{с}}$	2,31	2,92	4,39	7,84	13,83					
$\Delta h_{1i, \text{м}}$	0,35	0,44	0,66	1,18	2,08					
$p_{2M}, \text{МПа}$	32,00	26,45	19,43	13,31	9,93					
$I_r = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; v_a = 30 \text{ л}; G = 10000 \text{ Н}$										
$\Delta t_{1, \text{с}}$	1,95	2,17	2,47	4,02	4,32	4,69	4,92	6,32		
$\Delta h_{1i, \text{м}}$	0,29	0,33	0,37	0,60	0,65	0,70	0,74	0,95		
$p_{2M}, \text{МПа}$	32,00	28,87	25,39	15,89	14,84	13,71	13,10	10,35		
$I_r = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; v_a = 30 \text{ л}; G = 80000 \text{ Н}$										
$\Delta t_{1, \text{с}}$	2,31	2,68	3,30	6,31	7,65	10,39	13,43			
$\Delta h_{1i, \text{м}}$	0,35	0,40	0,50	0,95	1,15	1,56	2,01			
$p_{2M}, \text{МПа}$	32,00	28,30	24,00	15,19	13,50	11,39	10,06			

Таблица 2

Расчетные значения тахограмм второй фазы перемещения груза

П ара- метры	I_r [кг·м ²]; G [кН]			
	0,3; 10	0,3; 80	0,5; 10	0,5; 80
$\Delta t_2, \text{с}$	53,2	6,65	88,6	11,1
$\Delta h_{2i}, \text{м}$	7,98	1,00	13,3	1,66

Таблица 3

Расчетные значения высота подъема груза

H, м	I_r [кг·м ²]; G [кН]			
	0,3; 10	0,3; 80	0,5; 10	0,5; 80
$v_a = 20 \text{ л}$	125,07	21,868	167,869	28,241
$v_a = 30 \text{ л}$	124,358	22,655	208,924	34,017

Результаты расчета, приведенные в табл. 3 позволяют установить возможность реализации предлагаемого механизма подъема груза грузовой лебедкой с объемным гидроприводом с релейным управлением и системой механической и гидравлической рекуперации энергии применительно к различным техническим характеристикам кранов.

6. Заключение

Особенность функционирования объемного привода грузовой лебедки крана определяется чередованием подъема и опускания груза. Такой режим функционирования характерен для работы объемного гидропривода при его релейном управлении. Он также предполагает целесообразность рекуперации энергии положения и движения груза, что может быть реализовано в импульсном гидростатическом приводе, работа которого определяется взаимодействием его гидравлической и механической частей с частотой чередования импульсов движущего момента и позволяет обеспечивать рекуперацию энергии в гидростатической и механической форме в различных фазах своей работы.

Рассмотрение функционирования объемного привода с релейным управление в качестве привода грузовой лебедки позволило разработать его математическую модель, исследование которой, реализованное в среде программирования LabVIEW, позволило получить тахограммы работы механизма подъема груза и выявить особенности его функ-

ционирования, а также определить алгоритм расчета основных параметров.

Результаты расчета позволяют установить возможность реализации предлагаемого

механизма подъема груза применительно к различным техническим характеристикам кранов.

Список литературы

1. Справочник по кранам: В 2 т. Под общ. ред. М.М. Гохберга. М.: Машиностроение, 1988. Т. 1. 536 с.
2. Александров М.П. Грузоподъемные машины. М.: Изд-во МГТУ. 2000. 552с.
3. Вершинский А.В. Специальные грузоподъемные машины: в 8 кн. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005.
4. Никитин О.Ф. Гидравлика и гидропневмопривод. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 414 с.
5. Даршт Я.А. Гидропривод и средства автоматизации. Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2012. 108 с.
6. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. М.: Машиностроение, 1991. 384 с.
7. Автушко В.П. Теория и проектирование гидропневмоприводов: в 6 ч. Минск: БНТУ, 2015. Ч. 1. 163 с
8. Галдин Н.С., Курбатская О.В., Еремина С.В. Влияние основных параметров механизмов мостового крана на его производительность / Вестник СибАДИ. 2015. №4. С. 15-18.
9. Справочник по кранам: В 2 т. Под общ. ред. М.М. Гохберга. М.: Машиностроение, 1988. Т.2. 559 с.
10. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. СПб.: Политехника, 2005. 423 с
11. Расчеты крановых механизмов и их деталей подъемно-транспортных машин: в 2 т. Т. 1. М.: Машгиз, 1993. 187 с.
12. Никонов В.О., Посметьев В.И., Козлов Е.В., Бородкин В.О. Анализ конструктивных особенностей гидрофицированных технологических машин с рекуперацией потенциальной энергии рабочего органа с грузом // Воронежский научно-технический вестник. 2019. № 1. С. 4-19.
13. Сладковский А., Ханишевский Т., Матя Т. Динамика мостового крана. Ч.2.

References

1. Gokhberg M.M. *Spravochnik po kranam v 2 t. T. 1* [Crane Reference in 2 vols. Vol. 2] Moscow, Mashinostroenie, 1988. 520 p. (In Russian)
2. Aleksandrov M.P. *Gruzopodemnye mashiny* [Lifting-transport machines]. Moscow, MGTU imeni N.E. Bauman, 2000. 552 p. (In Russian)
3. Vershinskiy A.V. *Spetsialnye gruzopodyemnye mashiny: v 8 kn* [Special lifting machines]. Krasnoyarsk, IPTs KGTU, 2005. (In Russian)
4. Nikitin O.F. *Gidravlika i gidropnevmoпривод* [Hydraulics and hydraulic pneumatic drive]. Moscow, MGTU imeni N.E. Bauman, 2010. 414 p. (In Russian)
5. Darsht Y.A. *Gidroпривод i sredstva avtomatiki* [Hydraulic drive and automation equipment]. Kovrov, KGTA im. V.A. Dyagtereva, 2012. 108 p. (In Russian)
6. Navrotskiy K.L. *Teoriya i proektirovaniye gidro- i pnevmoprиводов* [Theory and design of hydraulic and pneumatic actuators]. Moscow, Mashinostroenie. 1991. 384 p. (In Russian)
7. Avtushko V.P. *Teoriya i proektirovaniye gidropnevmoприводов. Ch. 1* [Theory and design of hydraulic pneumatic actuators. Ch. 1]. Minsk: BNTU. 2015. (In Russian)
8. Galdin N.S., Kurbatskaya O.V., Eremina S.V. The influence of the main parameters of the bridge crane mechanisms on its performance. *Vestnik SibADI*, 2015, No.4, pp.15-18. (In Russian)
9. Gokhberg M.M. *Spravochnik po kranam v 2 t. T. 2* [Crane Reference. Vol. 2] Moscow: Mashinostroenie, 1988. 559 p. (In Russian)
10. Sokolov S.A. *Metallicheskiye konstruksii podyemno-transportnykh mashin* [Metal structures of lifting and transport machines]. Sankt-Peterburg. Politekhnik. 2005. 423 p. (In Russian)

Моделирование процесса подъема груза с постоянной скоростью // Вестник Восточно-украинского национального университета им. В. Даля. 2010. № 10. С.159-168.

14. Баранов К.А., Заярный С.Л. Исследование параметрической модели импульсного гидропривода подъема груза // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Мат. регион. научно-технич. конф., 18–20 апреля 2023 г. Т. 2. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. С. 8-12

15. Худорожков С.И., Захлебаев Е.А. Механическая бесступенчатая импульсная передача для современной малогабаритной транспортной техники // Глобальная энергия. 2015. №4.

16. Худорожков С.И., Галышев Ю.В. Динамика рекуперативного механического бесступенчатого привода транспортного средства // Глобальная энергия. 2013. №3.

17. Лагереv И.А., Лагереv А.В. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин. Брянск: Издательство БГТУ, 2013. 228 с.

18. Блюм П. LabVIEW: стиль программирования. М.: ДМК Пресс, 2008. 400 с.

19. Трэвис Д. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2011. 904 с

11. *Raschety kranovykh mekhanizmov i ikh detaley pod'yemno-transportnykh mashin* [Calculations of crane mechanisms and their parts of lifting and transport machines]. Moscow, Mashgiz. 1993. 187 p. (in Russian).

12. Nikonov V.O., Posmetyev V.I., Kozlov E.V., Borodkin V.O. Analysis of the design features of hydrofected technological machines with recovery of potential energy of the working body with a load. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskii vestnik*, 2019, No.1, pp. 4-19. (in Russian).

13. Sladkovsky A., Hanishevsky T., Matya T. Dynamics of a bridge crane. Part 2. Modeling the process of lifting a load at a constant speed. *Vestnik Vostochno-ukrainskogo nationalnogo universiteta im. V. Dalya*, 2010, No.10, pp.159-168. (in Russian)

14. Baranov K., Zayarny S.L. Investigation of a parametric model of a pulsed hydraulic drive for lifting cargo. In: *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.E. Bauman*, 2023. Pp. 8-12. (In Russian)

15. Khudorozhkov S.I., Zakhlebayev E.A. Mechanical stepless pulse transmission for modern small-sized transport equipment. *Globalnaya energiya*, 2015, No.4. (In Russian)

16. Khudorozhkov S.I., Galyshev Yu.V. Dynamics of the regenerative mechanical stepless drive of the vehicle. *Globalnaya energiya*, 2013, No.3. (In Russian)

17. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie pod'emno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting and transport machines]. Bryans, Izdatelstvo BGTU, 2013. 228 p. (In Russian)

18. Blyum P. *LabVIEW: stil programmirovaniya* [LabVIEW: Programming style]. Moscow, DMK Press, 2008. 400 p. (In Russian)

19. Trevis D. *LabVIEW dlya vseh* [LabVIEW for everyone]. Moscow, DMK Press, 2011. 904 p. (In Russian)