

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-920-931

DEVELOPMENT OF A STRUCTURALLY INTEGRATED ELECTRIC DRIVE OF JACK FOR CARGO OPERATIONS AT ONSHORE FACILITIES

S. A. Popov, V. E. Nechesov, S. V. Popova

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

The solution to the serious transport problems of lifting, fixing and lowering cargo, hull elements, scaffolding during construction and installation works performed by screw jacks at shipbuilding and ship repair enterprises, in ship docks is considered. Such disadvantages of hydraulic jacks as the inability to work at low and ultra-low temperatures, constant monitoring of the oil level, the tightness of oil seals and valves, transportation and storage only in an upright position, low operability, as well as the disadvantages of screw jacks such as the low starting torque of an asynchronous electric drive motor with the cylindrical stator bore, the lack of the ability to accurately position the load at height, led to the development of a hoist design which is characterized by increased carrying capacity, achieved by an additional increase in the torque transmitted to the nut of the structurally integrated electric drive of jack. Increasing the lifting capacity of the jack due to the built-in two-stage transmission, which reduces the rotation frequency, but at the same time increases the torque transmitted from the rotor to the nut, is researched. The ability to accurately fix the load at a height commensurate with the height of the prefabricated motor housing is achieved through an integrated braking device, which is activated after the supply voltage of the drive axial asynchronous electric motor is disconnected. This design will allow smooth lifting and lowering the load with its increased carrying capacity and precise fixation of the actuator, which allows to use it for multi-tiered construction of retractable closures, during inspection, repair, installation works and centering the assembly units of ships, as well as carry out work on lifting and lowering transshipment equipment in the port sector without using the additional expensive mounting equipment.

The developed calculation methods allow at the design stage to determine the stock of its carrying capacity and the dependence of the jack efficiency on the parameters of a two-stage transmission.

Keywords: screw hoist, jack, electric drive, structurally integrated, carrying capacity, axial asynchronous electric motor, two-stage transmission, efficiency.

For citation:

Popov, Sergey A., Vladimir E. Nechesov, and Svetlana V. Popova. "Development of a structurally integrated electric drive of jack for cargo operations at onshore facilities." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 920–931. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-920-931.

УДК 621.313

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДОМКРАТА ДЛЯ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ НА БЕРЕГОВЫХ ОБЪЕКТАХ

С. А. Попов, В. Е. Нечесов, С. В. Попова

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»,
Краснодар, Российская Федерация

Рассмотрено решение серьезной проблемы транспортных задач по подъему, фиксации и опусканию груза, элементов корпуса, строительных лесов при проведении строительных и монтажных работ, выполняемых винтовыми домкратами на судостроительных и судоремонтных предприятиях, в корабельных и судовых доках. Такие недостатки гидравлических домкратов, как отсутствие возможности работы при низких и сверхнизких температурах, постоянный контроль уровня масла, герметичности сальников и клапанов, транспортировка и хранение только в вертикальном положении, малооперативность, а также недостатки винтовых домкратов, такие как малый пусковой момент приводного асинхронного электродвигателя с цилиндрической расточкой статора, отсутствие возможности точного позиционирования груза на высоте, привели к разработке конструкции подъемника, которая отличается повышенной грузоподъемностью, достигаемой за счет дополнительного увеличения крутящего момента передаваемого на гайку конструктивно-интегрированного электропривода домкрата. Исследовано повышение грузоподъемности домкрата, реализуемое за счет встро-

енной двухступенчатой передачи, понижающей частоту вращения, но одновременно увеличивающей вращающий момент, передаваемый от ротора к гайке. Отмечается, что возможность точной фиксации груза на высоте, соизмеримой с высотой сборного корпуса электродвигателя, достигается за счет интегрированного тормозного устройства, срабатывающего после отключения питающего напряжения приводного аксиального асинхронного электродвигателя. Данная конструкция позволит осуществлять плавный подъем и опускание груза при его повышенной грузоподъемности и точной фиксации исполнительного органа электропривода, что дает возможность применять его для работы в многоярусной конструкции откатываемых закрытий, при осмотре, инспекции, ремонте, монтажных работах и центрировании сборочно-монтажных единиц кораблей и судов, а также выполнять работы по поднятию и опусканию перегрузочной техники в портовом хозяйстве без использования дополнительного дорогостоящего монтажного оборудования. Разработанные методики расчета позволяют на этапе проектирования определить запас его грузоподъемности и зависимость коэффициента полезного действия домкрата от параметров двухступенчатой передачи.

Ключевые слова: винтовой подъемник, домкрат, электропривод, конструктивно – интегрированный, грузоподъемность, аксиальный асинхронный электродвигатель, двухступенчатая передача, КПД.

Для цитирования:

Попов С. А. Разработка конструктивно–интегрированного электропривода домкрата для грузовых операций на береговых объектах / С. А. Попов, В. Е. Нечесов, С. В. Попова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 920–931. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-920-931.

Введение (Introduction)

Современный мир невозможно представить без усовершенствования способов подъема и транспортировки различных грузов. Подъемно-транспортные установки, в частности домкраты, активно применяемые в большинстве производств [1]–[4], предназначены для подъема грузов на небольшую высоту и нашли широкое применение при монтажных работах — подъемах с фиксацией как отдельных частей, так и целых сооружений и судов [5], [6]. Домкраты активно применяются на всех предприятиях, в том числе судостроительных и судоремонтных, а также в портовом хозяйстве.

На судах домкраты используют в многоярусной конструкции откатываемых закрытий, выполненных из двух секций, каждая из которых с их помощью может быть приподнята, при этом вторая подкатывается под нее, открывая половину люка. Для перемещения двигателя внутреннего сгорания в процессе его центровки к валопроводу и приводному механизму формируется технологическое оборудование, состоящее из винтовых и гидравлических домкратов, прокладок, такелажного оборудования и т. д. При центрировании сборочно-монтажных единиц в качестве отжимных механизмов используют гидравлические домкраты с обеспечением установки ограничительных упоров с противоположной стороны изделия на расчетном расстоянии [7].

В портовом хозяйстве домкраты используются при ремонте перегрузочной техники и контейнеров, а также смене колесной пары грузовых железнодорожных вагонов. Использование данного оборудования в большей степени определяет эффективность современного промышленного производства, так как уровень механизации производства является показателем совершенства производственного исполнения и производительности предприятия.

В каждой конструкции подъемника существуют свои достоинства и недостатки, при этом конструктивная особенность напрямую влияет на массогабаритные параметры и КПД установки. Перспективными направлениями улучшения конструкций домкратов являются:

- увеличение нагрузочной способности;
- снижение себестоимости;
- повышение КПД;
- сокращение времени поднятия и опускания груза;
- увеличение точности позиционирования.

К основным мероприятиям по повышению эффективности подъемно-транспортных установок относится совершенствование как энергетической части (применение новых конструкций приводных электродвигателей с улучшенными энергетическими, стоимостными и массогабаритными характеристиками), так и механической части путем применения новых типов передач.

В большинстве случаев, как в портовом хозяйстве, так и на судах, активно применяются гидравлические домкраты. Это вызвано рядом преимуществ, таких как высокий КПД и большая грузоподъемность. Однако имеется ряд существенных недостатков, а именно: отсутствие возможности работы при низких, сверхнизких температурах и точного регулирования высоты опускания груза, постоянный контроль уровня масла, герметичности сальников и клапанов, транспортировка и хранение данного оборудования должна происходить исключительно в вертикальном положении, во избежание вытекания гидравлической жидкости из резервуара. Кроме того, один цикл работы насоса соответствует относительно малой высоте подъема, в связи с чем гидравлические домкраты являются относительно малооперативным оборудованием. В основе предлагаемой разработки принята конструкция винтового домкрата с передачей *винт – гайка*. Преимуществами данной конструкции являются ее простота, высокая прочность при ударных нагрузках, возможность самоторможения и высокая кинематическая точность. Наиболее распространенные винтовые домкраты различных производителей приведены на рис. 1.

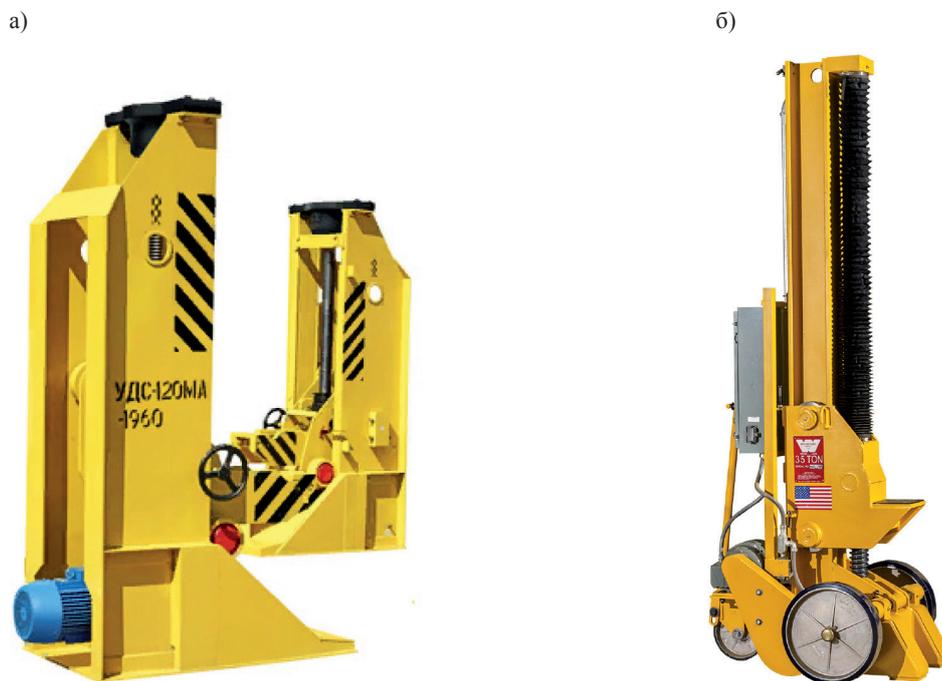


Рис. 1. Винтовые домкраты производителей:
а — Кубаньжелдормаш (Россия); б — Whiting corporation, Monee (Illinois, USA)

Кинематическая схема винтовых домкратов приведена на рис. 2.

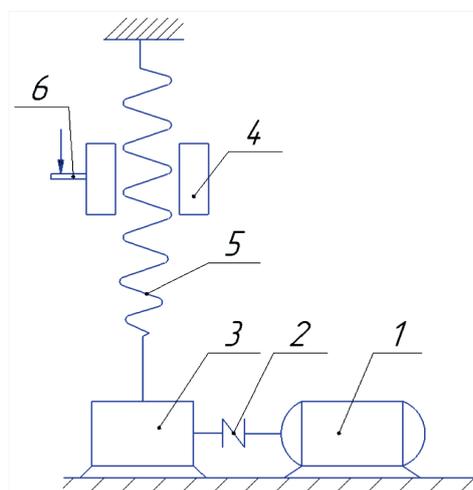


Рис. 2. Кинематическая схема электропривода подъемника

Согласно этой схеме, сопряженная с винтом 5 гайка установлена в подвижную каретку 4 с подвижной опорой 6. За счет передачи крутящего момента от приводного электродвигателя 1 с помощью муфты 2 червячному редуктору 3 нижний конец винта получает вращательное движение от глобоидного червячного редуктора. На кинематической схеме электропривода подъемника показано, что снижение КПД происходит в местах передачи *гайка – винт* в зонах контакта роликов подвижной каретки с направляющими, в местах соединения винта с редуктором, в редукторе, а также муфте.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Практика использования имеющихся подъемно-транспортных установок показала их основные недостатки:

1. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором цилиндрической конструкции, используемые в качестве приводного электродвигателя, обладают относительно малым пусковым моментом, что снижает нагрузочную способность домкрата, требуя установки двигателей повышенной мощности, и ведет к увеличению габаритов электропривода и его стоимостных показателей.

2. Отсутствие эффективной системы охлаждения ведет к снижению КПД двигателя, сокращению срока эксплуатации изоляции обмоток, что влечет за собой уменьшение надежности и скорый выход из строя приводного электродвигателя подъемно-транспортных установок.

3. Отсутствие в конструкции тормозного устройства уменьшает точность позиционирования груза на высоте.

4. Пониженный КПД за счет увеличенного числа передаточных механизмов.

Разработанная конструкция, представленная на рис. 3, позволяет повысить функциональные возможности домкрата, увеличить его грузоподъемность и расширить сферу применения [8].

Конструктивно-интегрированный электропривод (КИЭ) домкрата содержит аксиальный асинхронный двигатель (ААД), сборный корпус, состоящий из нижнего несущего щита 1 и верхнего несущего щита 2, закрепленных неподвижно между собой и образующих внутреннюю кольцевую полость 3 посредством болтового соединения 4. ААД выполнен в виде асинхронного одно-статорного однороторного аксиального электродвигателя. Магнитопровод статора 5 с обмоткой возбуждения 6 закреплен с внутренней торцевой стороны нижнего несущего щита 4. Ротор 7 выполнен в форме стакана, в котором расположено симметричное относительно осевой линии сквозное отверстие 8, при этом основание в нижней части стакана ротора 7 дополнительно сопрягается с гайкой 9 посредством радиально-упорного подшипника 10, внутреннее кольцо которого расположено в уступе 11 гайки 9, а внешнее находится в уступе 12, выполненном во внутренней нижней части диска 13. В верхней внешней части диска 13 расположен уступ 14, на внешнюю боковую поверхность которого надета пружина 15, одним концом упирающаяся в верхнюю поверхность уступа 14 в верхней внешней части диска 13, а другим — в нижнюю поверхность уступа 16 ротора 7. При этом, расстояние между нижней поверхностью уступа 16 ротора 7 и верхней торцевой поверхностью диска 13 выполнено с учетом того, что при отсутствии питания на обмотке возбуждения 6, расстояние между торцевой поверхностью магнитопровода статора 5 и нижней торцевой поверхностью основания ротора 7 должно быть равно суммарной величине рабочего воздушного зазора δ и аксиального перемещения Δ ротора вдоль внешней поверхности диска 14. С внутренней торцевой стороны верхнего несущего щита 2 неподвижно установлен тормозной диск 17 тормозного устройства, на котором неподвижно закреплена тормозная накладка 18. На верхней торцевой поверхности кольцевого диска ротора 7 закреплена пластина 19 при помощи винтового соединения 20. Гайка 9 позиционируется в нижнем несущем щите 1 и верхнем несущем щите 2 при помощи радиально-упорных подшипников 21, 24.

Во внутренней полости стакана ротора 7 расположена двухступенчатая передача, объединяющая в себе большое центральное зубчатое колесо 23 с внутренними зубьями, двухвенцовые сателлиты 24, малое центральное зубчатое колесо 25 с внешними зубьями, закрепленное неподвижно на гайке 9 при помощи шпонки 26, причем двухвенцовые сателлиты 24 позиционируются в верхнем

несущем щите 2 при помощи болтов 27. Винт 28 сопряжен с внутренней полостью гайки 9 посредством резьбового соединения 29. В верхней части винта 28 изготовлена головка 30 для принятия нагрузки.

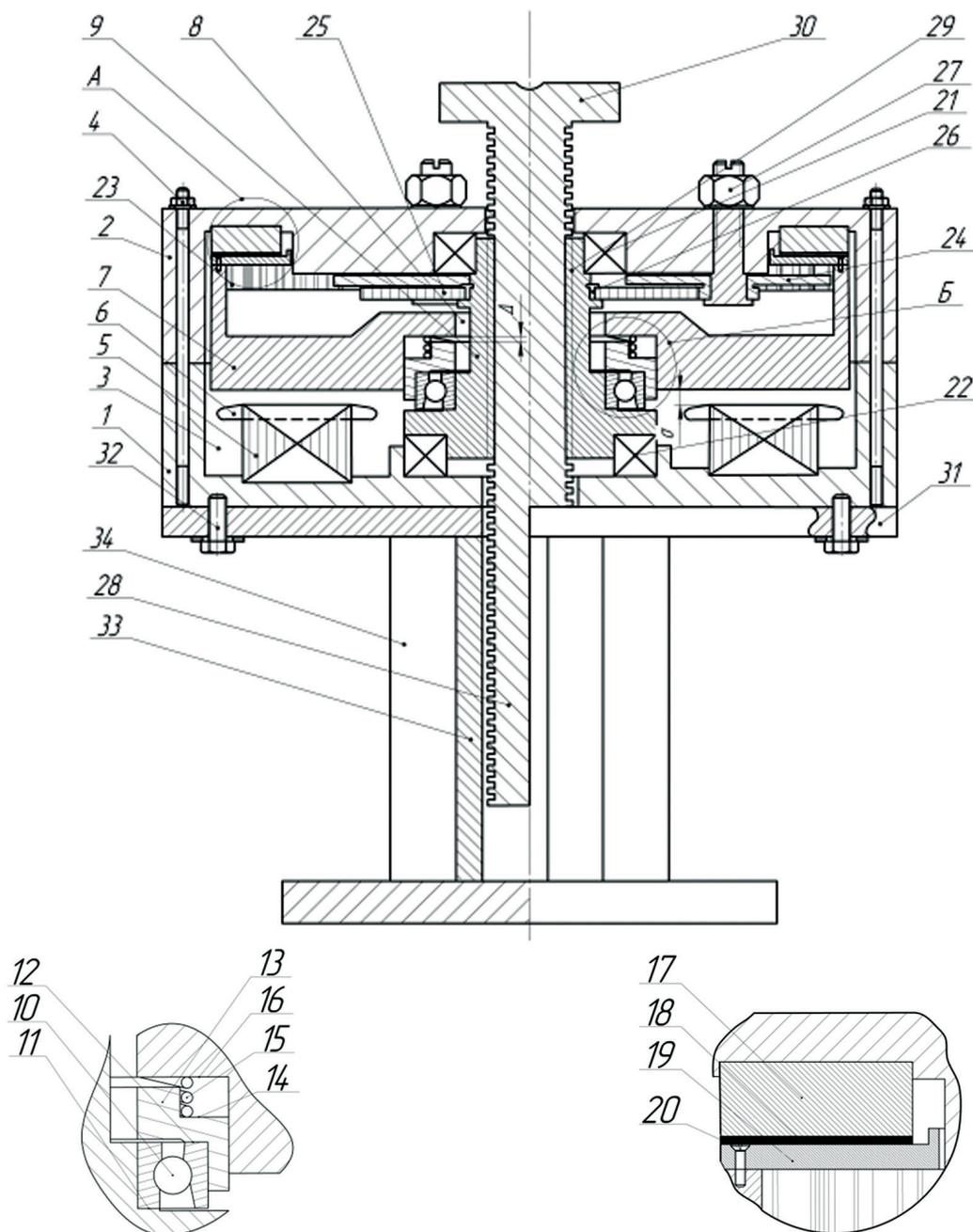


Рис 3. Конструктивно-интегрированный электропривод домкрата

Нижний несущий щит 1 и верхний несущий щит 2 образуют сборную конструкцию, расположенную на площадке 31, которая соединена с нижним несущим щитом 1 болтовым соединением 32, цилиндрической полую стойкой 33 и радиальными кронштейнами 34, усиливающими как цилиндрическую полую стойку 33, так и площадку 34.

Принцип работы домкрата

В качестве источника питания КИЭ домкрата может служить как источник синусоидального напряжения промышленной частоты, так и частотно-регулируемый источник, который является целесообразным при необходимости регулирования скорости подъема / опускания груза

и использовании винта 28 малой высоты. При подключении переменного синусоидального напряжения на обмотку возбуждения 6 магнитопровода статора 5, расположенного на внутренней торцевой стороне нижнего несущего щита 1, возникает пусковой ток, превышающий номинальный ток рабочего режима машины, вследствие чего возникает электромагнитное поле, под воздействием аксиального электромагнитного усилия которого кольцевой диск ротора 7 со сквозным отверстием 8 совершает аксиальное смещение вдоль гайки 9. При этом пружина 15, расположенная в уступе 14 верхней внешней части диска 13, одним концом упирающаяся в верхнюю поверхность уступа 14 в верхней внешней части диска 13, а другим — в нижнюю поверхность уступа 16 ротора 7, получит дополнительное сжатие, а зазор между нижней поверхностью уступа 16 ротора 7 и верхней торцевой поверхностью диска 13 будет уменьшаться. Между тормозной накладкой 18, закрепленной на тормозном диске 17, и пластиной 19, зафиксированной винтовым соединением 20 на верхней торцевой поверхности кольцевого диска ротора 7, образуется воздушный зазор, равный величине Δ , а между аксиальными рабочими поверхностями магнитопровода статора 5 и нижней торцевой поверхностью основания ротора 7 устанавливается рабочий зазор δ .

В это время во внутренней кольцевой полости 3 вращающееся магнитное поле приводит в движение стакан ротора 7 за счет того, что гайка 9 сопрягается со стаканом ротора 7 через радиально-упорный подшипник 10, внутреннее кольцо которого расположено в уступе 11 гайки 9, а внешнее находится в уступе 12, выполненном во внутренней нижней части диска 14. При этом центральное зубчатое колесо 23, расположенное во внутренней полости стакана ротора 7, через двухвенцовые сателлиты 24, закрепленные в верхнем несущем щите 2 при помощи болтов 27, приводит в движение малое центральное зубчатое колесо 25, закрепленное неподвижно на гайке 9 при помощи шпонки 26, увеличивая крутящий момент и уменьшая угловую частоту. Так как малое центральное зубчатое колесо 25 сопряжено неподвижно с гайкой 9 при помощи шпонки 26, крутящий момент будет передаваться гайке 9 и вращать ее в радиально-упорных подшипниках 21 и 24. При этом гайка 9 связана с винтом 28 посредством резьбового соединения 29 и при заторможенном винте 28 или нахождении груза на головке винта 30, вращающаяся гайка 9 будет поднимать или опускать винт 28. При этом нижний несущий щит 1 соединен неподвижно с верхним несущим щитом 2 посредством болтового соединения 4, и вся конструкция фиксируется на площадке 31 при помощи болтового соединения 34. Вес груза при этом будет действовать от нижнего несущего щита 1 через площадку 31, соединенную с цилиндрической полый стойкой 33, усиленной радиальными кронштейнами 34.

При отключении напряжения от обмотки возбуждения 6 исчезает магнитный поток, удерживающий кольцевой диск ротора 7 в рабочем положении. Вследствие этого тормозная пружина 15 вызывает обратное аксиальное смещение ротора 7 вдоль гайки 9. При этом тормозная накладка 18, закрепленная на тормозном диске 17, входит в контакт с пластиной 19, зафиксированной винтовым соединением 20 на верхней торцевой поверхности кольцевого диска ротора 7. В результате трения происходит остановка кольцевого диска ротора 7 и гайки 9. Это приводит к остановке винта 28 с автоматической фиксацией его положения, что повышает безопасность эксплуатации при работе с грузами. Применение самотормозящейся конструкции позволяет более точно позиционировать положение винта 28 после отключения напряжения от обмотки возбуждения 6 за счет ускоренного гашения накопленной энергии (электромагнитного поля и энергии вращения диска ротора) посредством тормозного устройства.

Увеличение грузоподъемности КИЭ домкрата (по сравнению с данными источника [9]) при установленной мощности приводного электродвигателя достигается за счет дополнительно увеличения крутящего момента, передаваемого на гайку. Это реализуется за счет встроенной двухступенчатой передачи, понижающей частоту вращения и одновременно увеличивающей вращающий момент, передаваемый от ротора к гайке. На основе разработанной конструкции изготовлен экспериментальный образец домкрата (рис. 4).

а)



б)



Рис. 4. Экспериментальный образец КИЭ винтового домкрата:
а — внешний вид; б — подготовка прибора к работе

Кинематическая схема экспериментального образца с параметрами двухступенчатой передачи приведена на рис. 5.

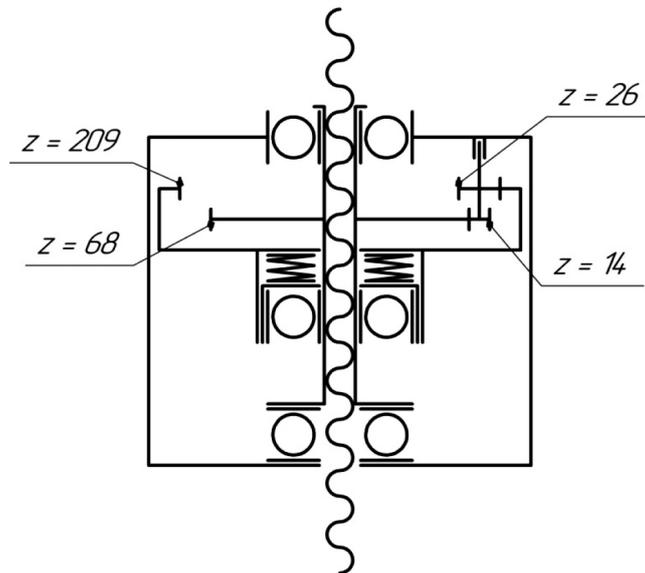


Рис. 5. Кинематическая схема КИЭ винтового домкрата
с аксиальным электродвигателем

Согласно источнику [10] и кинематической схеме, передаточное число

$$U_{\text{общ}} = \frac{Z_1 Z_4}{Z_2 Z_3} = \frac{26 \cdot 68}{209 \cdot 14} = 0,6, \quad (1)$$

где Z_1 — число зубьев шестерни большего диаметра двухвенцовых сателлитов;
 Z_2 — число зубьев центрального зубчатого колеса;
 Z_3 — число зубьев шестерни меньшего диаметра двухвенцовых сателлитов;
 Z_4 — число зубьев малого центрального зубчатого колеса.

За один оборот ротора, выполненного в виде стакана, малое центральное зубчатое колесо делает 0,6 оборота, т. е. происходит необходимое уменьшение частоты вращения и увеличение крутящего момента, действующего на гайку, что ведет к увеличению грузоподъемности домкрата с расширением его сферы применения и функциональных возможностей при работе на высоте, соизмеримой с высотой сборного корпуса электродвигателя.

Результаты (Results)

Подъемное усилие является основной характеристикой самотормозящегося винтового домкрата с аксиальным электродвигателем во время подъема и опускания груза. Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя в общем случае, в соответствии с источником [11],

$$M_M = M_T + M_B, \quad (2)$$

где M_T — тормозной момент, Н·м; M_B — полезный тормозной момент на валу, Н·м.

Тормозной момент M_T будет пропорционален механическим, вентиляционным и добавочным потерям в электродвигателе. Домкрат работает в кратковременном и повторно-кратковременном режиме, следовательно, вентиляционными и добавочными потерями можно пренебречь. Таким образом, получим

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{2\pi n}. \quad (3)$$

В конструкции КИЭ домкрата применяется двухступенчатая передача *гайка – винт* с увеличенным крутящим моментом, передаваемым на гайку (по сравнению с конструкцией [9]), а также с компактностью и плавностью хода [12].

Поступательное перемещение S гайки:

$$S = \frac{\varphi p_r k}{2\pi}, \quad (4)$$

где φ — угол поворота винта; p_r — шаг резьбы; k — число заходов резьбы.

Вращающий момент

$$M = F_c \frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho_c), \quad (5)$$

где $F_c = F_t \operatorname{tg} \alpha$ — сила, приложенная к поступательно движущемуся винту и, соответственно, к поднимаемому грузу, Н; d_{cp} — средний диаметр резьбы, мм; ψ — угол подъема винтовой линии; ρ_c — приведенный угол трения скольжения.

Выражение (4) можно записать в виде

$$M = \frac{F_t \operatorname{tg} \alpha d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho_c), \quad (6)$$

где F_t — осевая сила центрального зубчатого колеса и сателлита.

В целях определения параметров аксиального электродвигателя используем выражение для машинной постоянной аксиальных электрических машин [13]:

$$D_{cp}^2 l_\delta = \frac{6,1 \cdot 10^5 P'}{\alpha_\delta k_\delta k_{o\delta} A B_\delta n'}, \quad (7)$$

где D_{cp} — средний диаметр активной поверхности, м; l_δ — активная длина, м; $P' = P_{эм}$ — расчетная мощность, кВт; A — линейная нагрузка на среднем диаметре, А/м; B_δ — амплитуда индукции в зазоре, Тл; α_δ — коэффициент уплощения; k_δ — коэффициент формы кривой поля; $k_{o\delta}$ — обмоточный коэффициент.

Из формулы (5) с учетом выражения (6) имеем

$$M_B = \frac{1}{2 \cdot 6,1 \cdot 10^5} \alpha_\delta k_\delta k_{o\delta} A B_\delta n'. \quad (8)$$

Используя выражение (5) и (7), определим подъемную силу передачи двухступенчатая передача *гайка – винт* самотормозящегося винтового домкрата:

$$F_t = \frac{\alpha_\delta k_\delta k_{об} AB_\delta D_{cp} l_\delta}{6,1 \cdot 10^5 \pi \cdot \text{tg } \alpha \cdot d_{cp} \cdot \text{tg}(\psi + \rho_c)} \quad (9)$$

Полученное выражение показывает, что расчетное осевое усилие, необходимое для подъема и опускания груза самотормозящегося винтового домкрата с аксиальным электродвигателем, зависит прямо пропорционально от выбранных электромагнитных нагрузок, объема активных материалов магнитопровода и обратно пропорционально от типа и профиля резьбы, а также силы, возникающей в передаче *сателлит – центральное зубчатое колесо*, которое неподвижно закреплено на гайке.

Баланс мощности конструктивно-интегрированного электропривода домкрата представим в виде равенства (10) согласно рис. 6:

$$P_c = P_{\text{раб.орг}} + J\omega \frac{d\omega}{dt} + c\varphi \frac{d\varphi}{dt} + Li \frac{di}{dt} + m_{гр} g \frac{dh}{dt} h_{гр} + \Delta P_\Sigma, \quad (10)$$

где P_c — мощность, поступающая из сети на вход электропривода.

Мощность, расходуемая на реализацию движения рабочего органа с преодолением сил статического сопротивления, определяется следующим образом:

$$P_{\text{раб.орг}} = M_{\text{раб.орг}} \omega_{\text{раб.орг}} \quad (11)$$

Мощность $P_{\text{раб.орг}}$ полностью идет на увеличение потенциальной энергии поднимаемого груза: $m_{гр} g \frac{dh}{dt} h_{гр}$. В случае конструктивно-интегрированного электропривода домкрата присутствуют элементы, способные запасать энергию, где $J\omega \frac{d\omega}{dt}$ — мощность, направленная на изменение кинетической энергии в движущихся элементах электромеханической части (двухступенчатая передача), $c\varphi \frac{d\varphi}{dt}$ — мощность, расходуемая на изменение потенциальной энергии деформируемого элемента электропривода (тормозная пружина). Изменение энергии в индуктивном элементе электропривода определяется как $Li \frac{di}{dt}$. При работе электропривода часть энергии ΔP_Σ определяется как сумма потерь на нагрев в обмотках ААД и на трение в механической части.

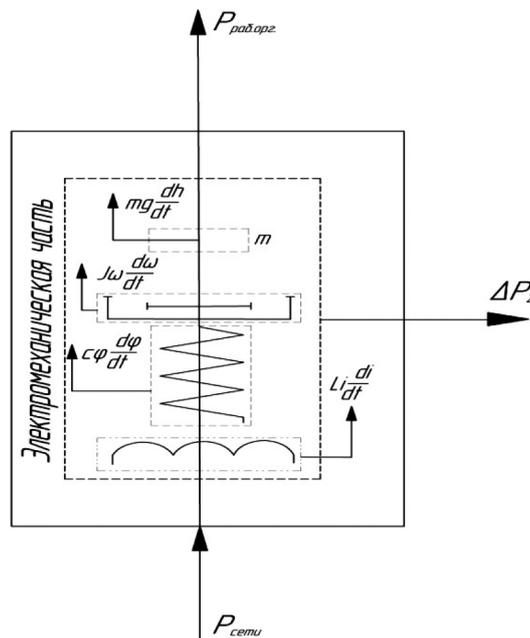


Рис. 6. Баланс мощности в конструктивно-интегрированном электроприводе

КПД конструктивно-интегрированного электропривода представим в виде следующего выражения:

$$\eta_{\text{КИЭ}} = \eta_{\text{э.п.}} \cdot \eta_{\text{мех.ч.}} \quad (12)$$

КПД электромеханического преобразователя:

$$\eta_{\text{э.п.}} = \frac{P_{\text{элмаг}}}{P_{\text{эм.п.}}}, \quad (13)$$

где $P_{\text{элмаг}}$ — электромагнитная механическая мощность; $P_{\text{эм.п.}}$ — мощность на входе электромеханической части.

КПД механической части привода:

$$\eta_{\text{мех.ч.}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{U_{13}^H}\right) \cdot (1 - \eta_{13}^H), \quad (14)$$

где U_{13}^H — передаточное число двухступенчатой передачи; η_{13}^H — КПД ступеней передачи при остановленном водиле.

С учетом выражений (13) и (14) КПД конструктивно-интегрированного электропривода домкрата:

$$\eta_{\text{КИЭ}} = \frac{P_{\text{элмаг}}}{P_{\text{эм.п.}}} \cdot 1 - \left(1 - \frac{1}{U_{13}^H}\right) \cdot (1 - \eta_{13}^H). \quad (15)$$

Из выражения (15) видно, что КПД конструктивно-интегрированного электропривода домкрата обратно пропорционален передаточному числу передачи.

Выводы (Summary)

На основе проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Усовершенствован механизм и предложен конструктивно-интегрированный электропривод винтового домкрата, позволяющий осуществлять плавный подъем и опускание груза при его повышенной грузоподъемности и точной фиксации исполнительного органа электропривода, что позволяет применять его для работы многоярусной конструкции откатываемых закрытий, осмотра, инспекции, ремонта, монтажных работ и центрировании сборочно-монтажных единиц кораблей и судов, а также выполнять работы по поднятию и опусканию при ремонте перегрузочной техники и контейнеров в портовом хозяйстве быстро и просто, без использования дополнительного монтажного и дорогостоящего оборудования в любых температурных режимах.

2. Разработанные методики расчета конструктивно-интегрированного электропривода домкрата позволяют на этапе проектирования определять запас грузоподъемности домкрата и его электромеханические свойства.

3. Сделан вывод о необходимости усовершенствования не только конструктивных особенностей механизмов, но и снижения их себестоимости, что сделает продукт конкурентоспособным на современном рынке и обеспечит поддержку отечественного производителя не только на российском, но и на международном уровне.

Коллектив авторов благодарит СКИБ «Энергия будущего» ФГБОУ ВО «КубГТУ» за оказанную помощь в разработке предложенного проекта и подготовке материалов статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O'Dwyer K. Interpretation of pipe-jacking and lubrication records for drives in silty soil / K. G. O'Dwyer, B. A. McCabe, B. B. Sheil // *Underground Space*. — 2019. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.04.001.
2. Ополькин А. П. Классификация грузоподъемных машин / А. П. Ополькин // *Проблемы науки*. — 2016. — № 8 (9). — С. 23–24.

3. Николаева Н. Д. Анализ домкратов и программный расчет основных параметров / Н. Д. Николаева, О. В. Мушкин, В. М. Труханов // Научное обозрение. Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 75–77.
4. Трифонов Г. И. Исследование подъемных механизмов средств наземного обслуживания общего применения и прогнозирование их износа / Г. И. Трифонов, С. Ю. Жачкин, С. В. Лазарев // Воздушно–космические силы. Теория и практика. — 2018. — № 7 (7). — С. 102–108.
5. Асминин В. В. Комплекс технических средств судоподъема, основанный на применении гидравлических тросовых домкратов / В. В. Асминин, А. В. Краморенко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № S1. — С. 30–35. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-30-35.
6. Zhang D. Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: A case study / D. Zhang, B. Liu, Y. Qin // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2016. — Vol. 60. — Pp. 151–164. DOI: 10.1016/j.tust.2016.08.009.
7. Герасимов Н. И. К вопросу центрирования тяжеловесных сборочно – монтажных единиц судового оборудования / Н. И. Герасимов, И. В. Грачев // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 2-2 (40). — С. 40–46.
8. Заявка на выдачу патента на изобретение № 2018147704. Самотормозящийся винтовой домкрат с аксиальным электродвигателем / С. А. Попов, В. Е. Нечесов, Н.В. Ладенко; заявл. 28.12.2018.
9. Пат. 2601996 Российская Федерация, МПК В66F 1/06, В66F 3/08, В66F 3/44. Самотормозящийся винтовой домкрат с аксиальным электродвигателем / С. А. Попов, Т. Б. Гайтова, Н. В. Ладенко, П. Ю. Пономарев, В. С. Спичак; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «КубГТУ». — № 2015119724/11; заявл. 25.05.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31.
10. Бильдюк Н. А. Детали машин / Н. А. Бильдюк, С. И. Каратушин, Г. Д. Малышев. — СПб.: Политехника, 2015. — 695 с.
11. Москаленко В. В. Электрические машины и приводы / В. В. Москаленко. — М.: Академия, 2018. — 128 с.
12. Попель О. Е. К вопросу снижения энергопотребления винтовыми электродомкратами типа ДТ-40 / О. Е. Попель, О. В. Олещук // Подъемно–транспортная техника. — 2014. — № 4 (44). — С. 53–60.
13. Григорьев М. А. Оптимизация геометрии электромеханических преобразователей / М. А. Григорьев [и др.] // Актуальные проблемы современной науки в 21 веке: сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. — Махачкала: Общество с ограниченной ответственностью «Апробация», 2015. — С. 32–36.

REFERENCES

1. O'Dwyer, Kevin G., Bryan A. McCabe, and Brian B. Sheil. "Interpretation of pipe-jacking and lubrication records for drives in silty soil." *Underground Space* (2019). DOI: 10.1016/j.undsp.2019.04.001
2. Opol'kin, A. P. "Klassifikatsiya gruzopod'emnykh mashin." *Problemy Nauki* 8(9) (2016): 23–24.
3. Nikolaeva, N. D., O. V. Mushkin, and V.M. Trukhanov. "Analysis of jacks and software calculation of the main parameters." *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* 3 (2016): 75–77.
4. Trifonov, G. I., S. Yu. Zhachkin, and S. V. Lazarev. "Lifting mechanisms investigation of ground service equipment for general use and forecasting their wear." *Vozdushno–kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* 7(7) (2018): 102–108.
5. Asminin, V., and A. Kramorenko. "Ship salvage complex using hydraulic strand jacks." *Transactions of the Krylov State Research Centre S1* (2018): 30–35.
6. Zhang, Dingwen, Bo Liu, and Yujun Qin. "Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: A case study." *Tunnelling and Underground Space Technology* 60 (2016): 151–164. DOI: 10.1016/j.tust.2016.08.009
7. Gerasimov, Nikolay I., and Ivan V. Grachev. "Centering of heavy-weight assembly and installation units of ship equipment." *Marine intelligent technologies* 2-2(40) (2018): 40–46.
8. Popov, S. A., V. E. Nechesov, and N. V. Ladenko. Self-braking screw jack with axial motor. Application for the invention; No. 2018147704. 28 Dec. 2018.
9. Popov, S. A., T. B. Gaitova, N. V. Ladenko, P. Yu. Ponomarev, and V. S. Spichak. RU 2 601 996 C2, IPC B66F 1/06, B66F 3/08, B66F 3/44. Samotormozyashchiysya vintovoi domkrat s aksial'nym elektrodvigatелем. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Nov. 2016.
10. Bil'dyuk, N. A., S. I. Karatushin, and G.D. Malyshev. *Detali mashin*. SPb.: Politekhnik, 2015.

11. Moskalenko, V. V. *Elektricheskie mashiny i privody*. M.: Akademiya, 2018.
12. Popel', O. E., and O. V. Oleshchuk. "K voprosu snizheniya energopotrebleniya vintovymi elektrodomkratami tipa DT-40." *Pod'emno-transportnaya tekhnika* 4(44) (2014): 53–60.
13. Grigor'ev, M. A., A. N. Shishkov, E. V. Belousov, D. A. Sychev, N. I. Naumovich, and E. S. Khayatov. "Optimizatsiya geometrii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei." *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki v 21 veke: Sbornik materialov VIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Makhachkala: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu «Aprobatsiya», 2015. 32–36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Попов Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет
350072, Российская Федерация, г. Краснодар,
ул. Московская, 2
e-mail: sa_popov@inbox.ru
Нечесов Владимир Евгеньевич — аспирант
Научный руководитель:
Попов Сергей Анатольевич
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет
350072, Российская Федерация, г. Краснодар,
ул. Московская, 2
e-mail: vlad.nechosov@mail.ru
Попова Светлана Валентиновна — аспирант
Научный руководитель:
Попов Сергей Анатольевич
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет
350072, Российская Федерация, г. Краснодар,
ул. Московская, 2
e-mail: s.sv.23@mail.ru

Popov, Sergey A. —
PhD, associate professor
Kuban State Technological University
2 Moskovskaya Str.,
Krasnodar, 350072,
Russian Federation
e-mail: sa_popov@inbox.ru
Nechesov, Vladimir E. — Postgraduate
Supervisor:
Popov, Sergey A.
Kuban State Technological University
2 Moskovskaya Str.,
Krasnodar, 350072,
Russian Federation
e-mail: vlad.nechosov@mail.ru
Popova, Svetlana V. — Postgraduate
Supervisor:
Popov, Sergey A.
Kuban State Technological University,
2 Moskovskaya Str.,
Krasnodar, 350072,
Russian Federation
e-mail: s.sv.23@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 8 августа 2019 г.
Received: August 8, 2019.*