УДК 621.833.389

Н. И. Рогачевский

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПРИВОДА СТРЕЛЫ ШЛАГБАУМА С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

UDC 621.833.389

N. I. Rogachevsky

INVESTIGATION OF ENERGY-SAVING DRIVE WITH IMPROVED CHARACTERISTICS FOR A BARRIER GATE BOOM

Аннотация

Приведен анализ конструкций приводов шлагбаумов. Предложены две конструкции электромеханического привода шлагбаума на основе червячной передачи качения и кулисного механизма, позволившие двукратно уменьшить энергопотребление в сравнении с аналогами. Разработан алгоритм расчета, по которому составлена программа для многократных вычислений и построения графических зависимостей от угла поворота стрелы в диапазоне [0, 90°] ее угловой скорости, центробежной, вращательной, равнодействующей сил инерции, главного момента сил инерции, горизонтальной и вертикальной реакций на выходной вал привода, суммарных передаваемых валом момента и мощности. Приведены результаты исследований двух энергосберегающих приводов стрелы шлагбаума с улучшенными кинематическими и динамическими характеристиками.

Ключевые слова:

привод, червячная передача, червячная передача качения, кулисный механизм, кинематические характеристики, динамические характеристики, энергосбережение.

Abstract

The paper analyzes the designs of drives used in barrier gates. Two designs of the electromechanical drive for barrier gates are offered which use worm transmission by rolling and a rocker mechanism and reduce power consumption two-fold in comparison with similar designs. A calculation algorithm and computer program were developed for multiple calculations and construction of graphical dependencies between the angle of boom rotation in the range [0, 90°] and its angular velocity, centrifugal, rotational, resultant forces of inertia, the principal moment of inertia forces, horizontal and vertical reactions on the output shaft of the drive, the total torque and power transmitted by the shaft. The results of the research on two energy-saving drives with improved kinematic and dynamic characteristics used in the barrier gate boom are presented.

Key words:

drive, worm transmission, worm transmission by rolling, rocker mechanism, kinematic characteristics, dynamic characteristics, energy saving.

Введение

Шлагбаумы являются самыми распространенными устройствами для оперативного управления потоками автотранспорта и ограничения проезда на автостоянки, парковки, платные автомагистрали и т. д.

Конструктивно шлагбаум состоит из стойки с приводом, стрелы и блока управления. Привод выполняет подъем и опускание стрелы шлагбаума.

Основными характеристиками шлагбаумов являются длина стрелы и время ее подъема (опускания). Длина стрелы может варьироваться от 1,5…3 до 8…10 м. Время подъема стрелы шлагбаума обычно составляет от 1 до 10 с.

© Рогачевский Н. И., 2017

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

В зависимости от типа привода шлагбаумы делятся на электромеханические и гидравлические. Привод электромеханического шлагбаума включает электродвигатель, редуктор и балансирную пружину. В состав силового механизма гидравлического шлагбаума входят гидропривод и балансирная пружина. Благодаря более низкой стоимости наибольшее распространение получили электромеханические шлагбаумы.

В Республике Беларусь шлагбаумы выпускаются в недостаточном количестве только на УП НАН Беларуси «Научное приборостроение», поэтому их закупают у зарубежных производителей: итальянских фирм NICE, CAME, RAPAN, FAAC; немецкой ELKA; украинского ОАО «Редукторный завод» и др. Цена этих шлагбаумов колеблется от 870 до 18720 долл. в зависимости от технических характеристик и комплектации.

В качестве передаточных механизмов электромеханических приводов шлагбаумов перечисленных производителей чаще всего служат двухступенчатые червячные редукторы, обладающие низким КПД, поэтому в приводах применены двигатели (как правило, 230…300 Вт) с большим запасом мощности, который компенсирует потери (более 50 % передаваемой энергии) в передачах. Анализ работы зарубежных аналогов показал, что после набора оборотов электродвигателем поворот стрелы происходит с постоянной скоростью, а это вызывает значительные динамические нагрузки в начале и в конце рабочего хода, на преодоление которых также расходуется значительная энергия.

Авторами предлагается шлагбаум с приводом, имеющим характеристики западных и отечественного аналогов, но с мощностью двигателя 120 Вт ($n_{дв}$ = 1350 мин$^{-1}$), т. е. в 2 раза меньшей. Использование такого привода стало возможным благодаря замене обычного двухступенчатого червячного редуктора на ременную передачу и оригинальную червячную передачу качения [1], которые имеют передаточные отношения соответственно 4 и 40. В разработанной авторами конструкции дополнительно введен кулисный механизм, что позволило значительно распределить угловые скорости в начале и в конце рабочего хода стрелы, т. е. снизить динамические нагрузки и потери энергии на их преодоление.

Таким образом, создание и исследование энергосберегающего шлагбаума является актуальным, особенно для Беларуси, бедной природными источниками энергии. Выполненная работа способствует импортозамещению зарубежных шлагбаумов, что также актуально.

Цель работы

Создание и исследование энергосберегающего привода шлагбаума с улучшенными кинематическими и динамическими характеристиками.

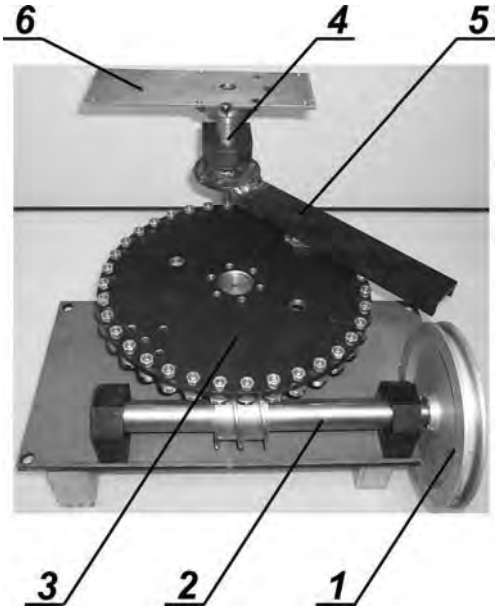
Методы исследования

Аналитические зависимости, характеризующие геометрические, кинематические и динамические параметры энергосберегающего шлагбаума, получены точными методами геометрии, кинематики, динамики и математического анализа.

Устройство и работа энергосберегающего шлагбаума

Разработанный авторами шлагбаум с электромеханическим приводом на основе энергосберегающей передачи качения [1] изготовлен в гараже Могилевского облисполкома и работает на въезде на территорию гаража, выполняя ежедневно более 130 рабочих циклов. Он состоит из стойки и стрелы, а также блока управления, расположенного в корпусе стойки. Стрела представляет собой планку из алюминиевого пустотелого профиля,

ограниченную с обоих торцов деревянными заглушками. На обеих сторонах планки закреплены через шаг по семь стеклянных светоотражателей. С целью предотвращения повреждения автомобилей в пазах ребер планки установлены противоударные резиновые накладки. Стрела крепится шестью болтами М6 × 50 к планке поворотной 6 (рис. 1) передаточного механизма электромеханического привода шлагбаума.



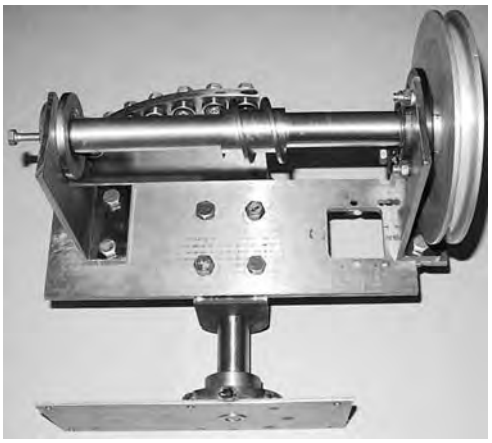


Рис. 1. Передаточные механизмы приводов шлагбаумов

Стойка состоит из каркаса, двух боковых *V*-образных пластин и крышки, соединенных винтами М5 × 6. На каркасе закреплено с помощью двух петель винтовое натяжное устройство клиноременной передачи, на поворотной пластине которого установлен электродвигатель. На кронштейнах каркаса посредством четырех болтов М8 × 25 закреплен передаточный механизм привода шлагбаума, представленный на рис. 1, состоящий из ведомого шкива 1 клиноременной передачи, установленного на ведущем валу-червяке 2, зацепляющемся с ведомым колесом 3 червячной передачи посредством тел качения (внешних колец шариковых подшипников 80025 ГОСТ 8338–75). Колесо 3 приводит в движение кулису 5, жестко связанную через ведомый вал 4 с поворотной планкой 6 для установки стрелы шлагбаума. Кулисный механизм в приводе значительно улучшает кинематические и динамические характеристики шлагбаума. С целью предотвращения произвольного опускания стрелы (закрытия шлагбаума) на ведомом валу 4 закреплен рычаг, на конце которого зафиксирована балансирная пружина, другим концом прикрепленная к корпусу стойки шлагбаума.

Опорами валов и кулисы передаточного механизма служат подшипники вала червячного колеса – 80202, вала-винта (червяка) – 80104, кулисного камня – 80029. Ведомый вал установлен в подшипниках скольжения, выполненных из фторопласта. Все используемые в передаточном механизме подшипники качения (типа 80000) снабжены шайбами для защиты от утечки смазочного материала и от проникновения пыли. Поэтому червячная передача качения работает без масляной ванны, как от-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

крытая. Это качество приобретает особую значимость при эксплуатации шлагбаума при низких температурах.

Управление шлагбаумом осуществляется с помощью дистанционного пульта посредством двух контакторов. Поворот стрелы ограничивается двумя концевыми выключателями. В случае отсутствия напряжения в электрической сети или отказа системы управления открытие шлагбаума осуществляется в ручном варианте вращением червяка 2 (см. рис. 1) посредством специального торцового ключа, вставленного в боковое отверстие стойки, закрытое пластмассовой заглушкой.

Созданный автором шлагбаум имеет следующие значения основных параметров: время подъема (опускания) стрелы на 90° – 4,6 с; длина стрелы – 4 м; угловая скорость стрелы на угле поворота 90° – 0…0,37…0 $с^{-1}$; электродвигатель трехфазный АИР56А4 (мощность – 0,12 кВт, частота вращения – 1350 $мин^{-1}$), электродвигатель может быть подключен к сети напряжением 220 В с применением конденсаторов; габаритные размеры шлагбаума в сборе – 1050 × 350 × 4210 мм, в том числе стойки – 1050 × 320 × 420 мм; масса шлагбаума – 32 кг.

Шлагбаум работает следующим образом. При нажатии кнопки «Подъем» пульта управления срабатывает соответствующий контактор, коммутирующий определенные обмотки электродвигателя с электрической сетью. Электродвигатель посредством клиноременной передачи приводит во вращение червяк 2 (см. рис. 1) передаточного механизма шлагбаума, винтовая поверхность которого воздействует поочередно на внешние кольца подшипников 80025, установленных на пальцах через шаг по делительной окружности колеса 3. Кольца подшипников перекатываются по винтовой поверхности червяка 2 и поступательно перемещаются совместно с установленными на колесе 3 пальцами, в результате колесо 3 непрерывно вращается, поворачивая посредством кулисного подшипника 80029, кулисы 5, вала ведомого 4 и планки поворотной 6 стрелу шлагбаума в вертикальное положение. Крайнее положение стрелы шлагбаума фиксируется нажатием кулисой 5 на стержень концевого выключателя, дающего команду контактору на отключение двигателя от электрической сети. При нажатии кнопки «Опускание» пульта управления срабатывает другой контактор, способствующий вращению вала электродвигателя в противоположную сторону, в результате чего все подвижные детали передаточного механизма привода шлагбаума поворачиваются в противоположную сторону, опуская стрелу шлагбаума в горизонтальное положение, которое фиксирует другой концевой выключатель, сигнализирующий другому контактору на отключение электродвигателя от сети.

Наряду с работающим (описанным выше) передаточным механизмом, создан передаточный механизм (представленный на рис. 1 справа) привода скоростного шлагбаума, отличающийся отсутствием кулисы и наличием сектора вместо колеса, что позволило уменьшить число шариковых подшипников 80025 с 40 у колеса до 10 у сектора. Шлагбаум с таким механизмом сохраняет недостаток зарубежных аналогов: движение стрелы происходит с постоянной скоростью, что вызывает значительные динамические сопротивления в начале и в конце рабочего хода, на преодоление которых дополнительно расходуется значительная энергия двигателя. Поэтому в данном случае двигатель мощностью 120 Вт может приводить в движение стрелу длиной до 3 м, при этом время ее подъема сокращается с 4,60 до 1,78 с. Последнее качество шлагбаума является основным при эксплуатации его на скоростных платных автомагистралях, например, на автодороге Москва – Минск – Варшава, которую в настоящее время обслуживают импортные шлагбаумы.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

Исследование энергосберегающего привода шлагбаума

Для научно обоснованного подхода к проектированию, обслуживанию и ремонту предложенного шлагбаума необходимы исследования его работы в пределах рабочего цикла. Определим на угле поворота стрелы от 0 до 90° функции изменений ее угловой скорости, центробежной, вращательной, равнодействующей сил инерции, главного момента сил инерции, горизонтальной и вертикальной реакций на выходной вал привода, суммарных передаваемых валом момента и мощности. Установим угловые положения стрелы, соответствующие экстремальным значениям указанных функций, произведем их анализ.

Частота вращения червяка

$$n_ч = n_{дв} / u_{рп},$$

где $n_{дв}$ – частота вращения вала электродвигателя; $u_{рп}$ – передаточное отношение ременной передачи.

Частота вращения червячного колеса (колеса с подшипниками качения на пальцах)

$$n_{чк} = n_ч / u_{чп},$$

где $u_{чп}$ – передаточное отношение червячной передачи качения.

Окружная скорость кулисного камня (подшипника), расположенного на концентрической окружности радиусом r на червячном колесе (рис. 2),

$$\upsilon = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n_{чк}}{60000} = \frac{\pi \cdot r \cdot n_{чк}}{30000}.$$

Угловая скорость червячного колеса

$$\omega = \frac{\upsilon}{r} = \frac{\pi \cdot n_{чк}}{30}.$$

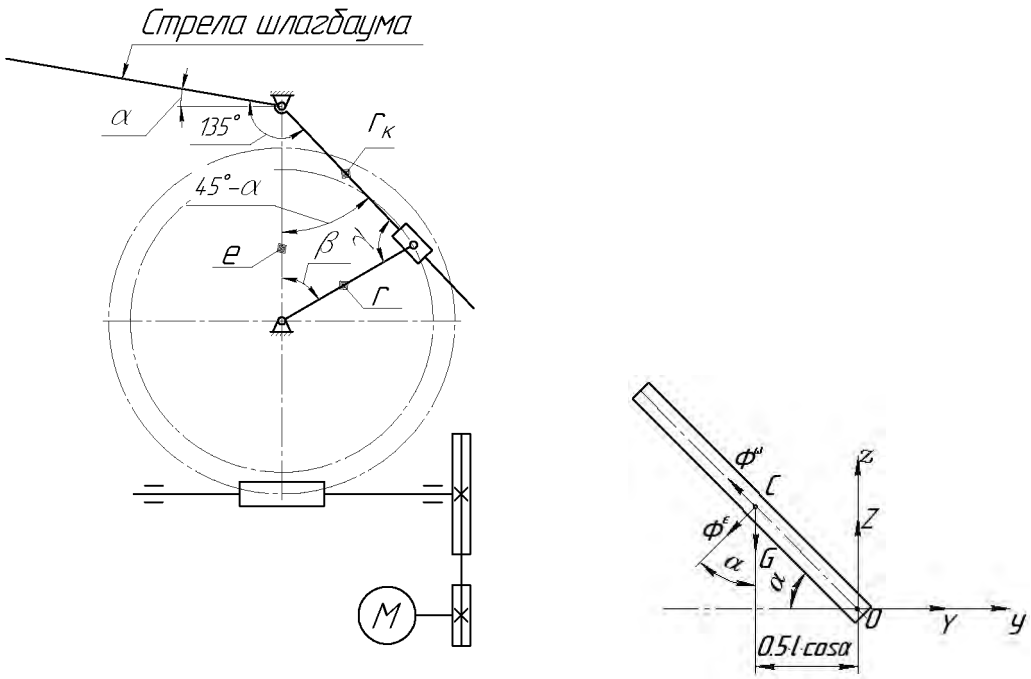


Рис. 2. Кинематическая схема привода шлагбаума и силовая схема его стрелы

Угол между кулисой и отрезком r, соединяющим центры кулисного камня (подшипника) и червячного колеса,

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{e\cdot\sin(45^\circ-\alpha)}{r}\right),$$

где α – угол поворота стрелы шлагбаума; e – межосевое расстояние между опорами червячного колеса и стрелы шлагбаума.

Угол между отрезками e и r

$$\beta = 180^\circ-\gamma-(45^\circ-\alpha) = 135^\circ-\gamma+\alpha.$$

Удаление центра кулисного камня (подшипника) от оси поворота стрелы шлагбаума:

$$r_к = \frac{r\cdot\sin\beta}{\sin(45^\circ-\alpha)}.$$

Окружная скорость точки кулисы, совпадающей с центром кулисного камня (подшипника),

$$\upsilon_к = \upsilon\cdot\cos\gamma.$$

Угловая скорость кулисы

$$\omega_к = \frac{\upsilon_к}{r_к} = \frac{\pi\cdot n_{чк}\cdot\cos\gamma\cdot\sin(45^\circ-\alpha)}{30000\cdot\sin\beta}.$$

Передаточное отношение кулисного механизма

$$u_к = \frac{\omega}{\omega_к}.$$

Угловое ускорение кулисы (стрелы шлагбаума)

$$\varepsilon_к = \frac{d\omega_к}{dt} = \frac{\pi\cdot n_{чк}}{30000}\cdot\left(\frac{U}{V}\right)' = \frac{\pi\cdot n_{чк}}{30000}\cdot\frac{U'\cdot V-U\cdot V'}{V^2},$$

где U, V и U', V' – промежуточные аргументы сложной функции $\varepsilon_к$ и их производные [2],

$$U = \cos\gamma\cdot\sin(45^\circ-\alpha);$$

$$V = \sin(135^\circ-\gamma+\alpha);$$

$$V' = \left(\omega_к - \frac{e\cdot\cos(45^\circ-\alpha)\cdot\omega_к}{\sqrt{r^2-e^2\cdot\sin^2(45^\circ-\alpha)}}\right)\times$$

$$\times\cos(135^\circ-\gamma+\alpha);$$

$$U' = K'\cdot L + K\cdot L',$$

где K, L и K', L' – промежуточные аргументы сложной функции U и их производные,

$$K = \cos\gamma;$$

$$L = \sin(45^\circ-\alpha);$$

$$K' = e\cdot\sin(45^\circ-\alpha)\cdot\cos(45^\circ-\alpha)\times$$

$$\times\,\omega_к / \sqrt{r^2-e^2\cdot\sin^2(45^\circ-\alpha)};$$

$$L' = -\omega_к\cdot\cos(45^\circ-\alpha).$$

Найденные кинематические характеристики привода стрелы шлагбаума применим для выявления ее динамических характеристик, используя рис. 2, на котором приведена схема стрелы с центром тяжести C и центром шарнира O ее поворота.

Модули равнодействующих вращательных ϕ^ε и центробежных ϕ^ω сил инерции точек стрелы:

$$\phi^\varepsilon = m\cdot\omega_c^\varepsilon = m\cdot 0{,}5\cdot l\cdot\varepsilon;$$

$$\phi^\omega = m\cdot\omega_c^\omega = m\cdot 0{,}5\cdot l\cdot\omega^2;$$

где l – длина стрелы; m – масса стрелы.

Модуль равнодействующей сил инерции

$$\overline{\phi} = \overline{\phi^\varepsilon} + \overline{\phi^\omega};$$

$$\phi = \sqrt{\left(\phi^\varepsilon\right)^2 + \left(\phi^\omega\right)^2}.$$

Силы $\overline{\phi^\varepsilon}$ и $\overline{\phi^\omega}$ направлены противоположно вращательному $\overline{\omega_c^\varepsilon}$ и центростремительному $\overline{\omega_c^\omega}$ ускорениям центра тяжести стрелы.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

Приложим в центре тяжести C стрелы ее силу тяжести $G = 9{,}81m$. Заменим действие шарнира O реакцией, разложив ее на составляющие $\overline{Y}$ и $\overline{Z}$. Для определения этих составляющих по принципу Эйлера – Даламбера составим для плоской системы сил $\overline{G}$, $\overline{Y}$, $\overline{Z}$, $\overline{\phi^{\varepsilon}}$, $\overline{\phi^{\omega}}$ уравнение проекций на оси Y и Z:

$$\sum Y_{\mathrm{I}} = 0;$$

$$Y - \phi^{\omega} \cdot \cos\alpha - \phi^{\varepsilon} \cdot \sin\alpha = 0,$$

откуда

$$Y = \phi^{\omega} \cdot \cos\alpha + \phi^{\varepsilon} \cdot \sin\alpha.$$

$$\sum Z_{\mathrm{I}} = 0;$$

$$-G - \phi^{\varepsilon} \cdot \cos\alpha + \phi^{\omega} \cdot \sin\alpha + Z = 0,$$

откуда

$$Z = G + \phi^{\varepsilon} \cdot \cos\alpha - \phi^{\omega} \cdot \sin\alpha.$$

Найдем величину главного момента сил инерции относительно точки *0* (динамического момента):

$$M^{\phi} = I_X \cdot \varepsilon_K,$$

где I_X – момент инерции стрелы относительно оси вращения,

$$I_X = I_{CX} + m \cdot (l/2)^2,$$

где I_{CX} – момент инерции стрелы относительно оси, проходящей через центр C ее массы,

$$I_{CX} = \frac{m \cdot l^2}{12}.$$

Тогда

$$I_X = \frac{m \cdot l^2}{12} + m \cdot (l/2)^2 = \frac{m \cdot l^3}{3}.$$

После подстановки в уравнение для M^{ϕ} получим

$$M^{\phi} = \frac{m \cdot l^2 \cdot \varepsilon_K}{3}.$$

Расстояние от точки *0* до линии действия силы $\overline{\phi}$

$$h = \frac{\left|M^{\phi}\right|}{\phi}.$$

Момент сопротивления повороту (подъему) стрелы из-за преодоления ее силы тяжести (статический момент)

$$M = 0{,}5l \cdot G \cdot \cos\alpha.$$

Суммарный момент сопротивления подъему стрелы

$$M_{\sum} = M + M^{\phi}.$$

Мощность, потребляемая приводом, для поворота (подъема) стрелы

$$P_{П} = M_{\sum} \cdot \omega_K.$$

Используя полученные зависимости, исследовали кинематические, силовые и динамические характеристики созданного шлагбаума, у которого $n_{дв}$ = 1350 мин$^{-1}$, $u_{рп} = 4$, $u_{чп} = 40$, $r = 100$ мм, $e = 141{,}42$ мм, $l = 4000$ мм, $m = 5{,}61$ кг.

По полученным формулам разработан алгоритм расчета, по которому составлена программа для многократных вычислений и построения графических зависимостей, некоторые из них представлены на рис. 3–6.

Согласно рис. 3, благодаря кулисному механизму значительные изменения угловой скорости стрелы в начале и в конце ее движения наблюдаются в широких интервалах угла поворота [0°, 18°] и [72°, 90°], что оказывает благоприятное влияние на динамические характеристики (см. рис. 4–6) шлагбаума.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

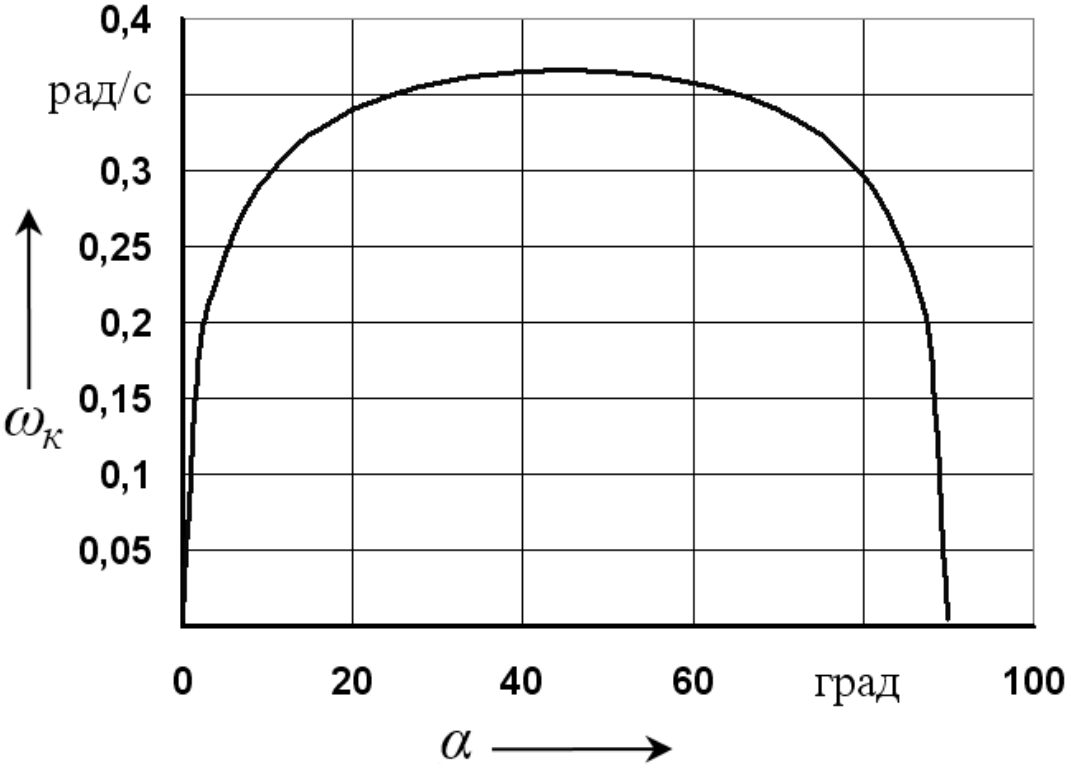


Рис. 3. Характер изменения угловой скорости стрелы на угле 90° ее поворота

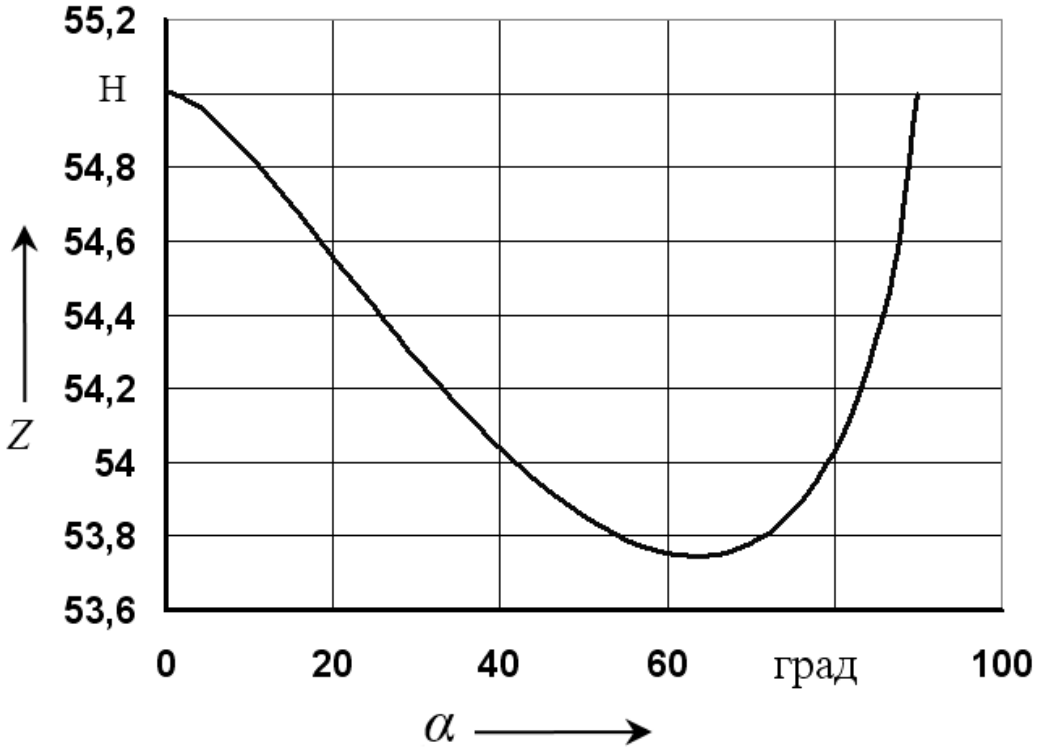


Рис. 4. Изменение вертикальной реакции стрелы на выходной вал на угле 90° ее поворота

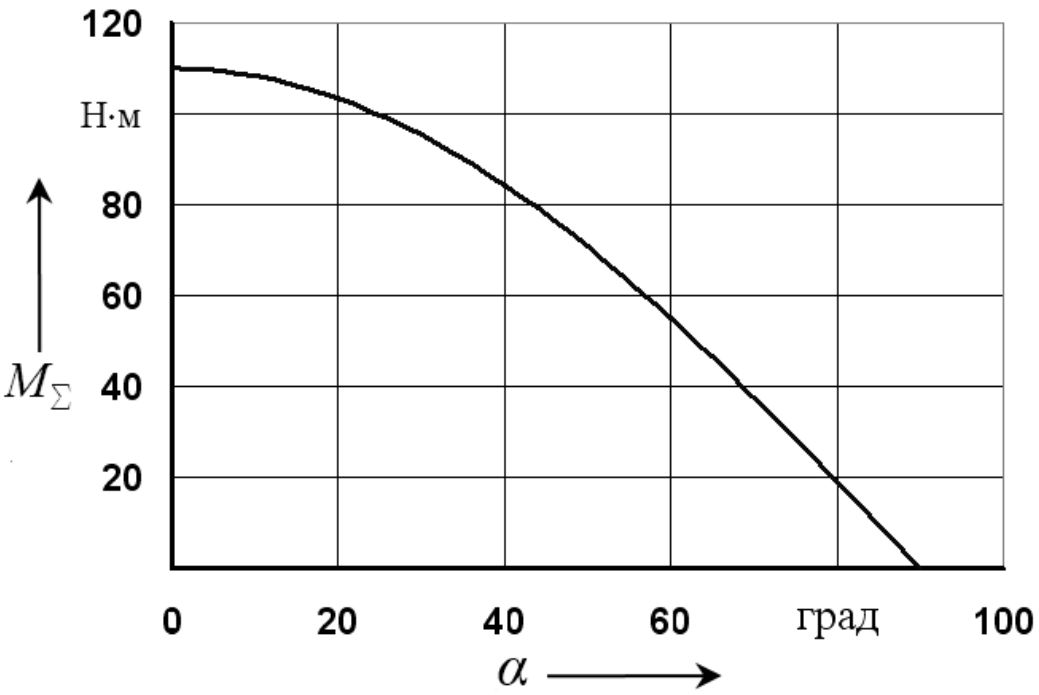


Рис. 5. Изменение действия суммарного (статического и динамического) момента стрелы на выходной вал на угле 90° ее поворота

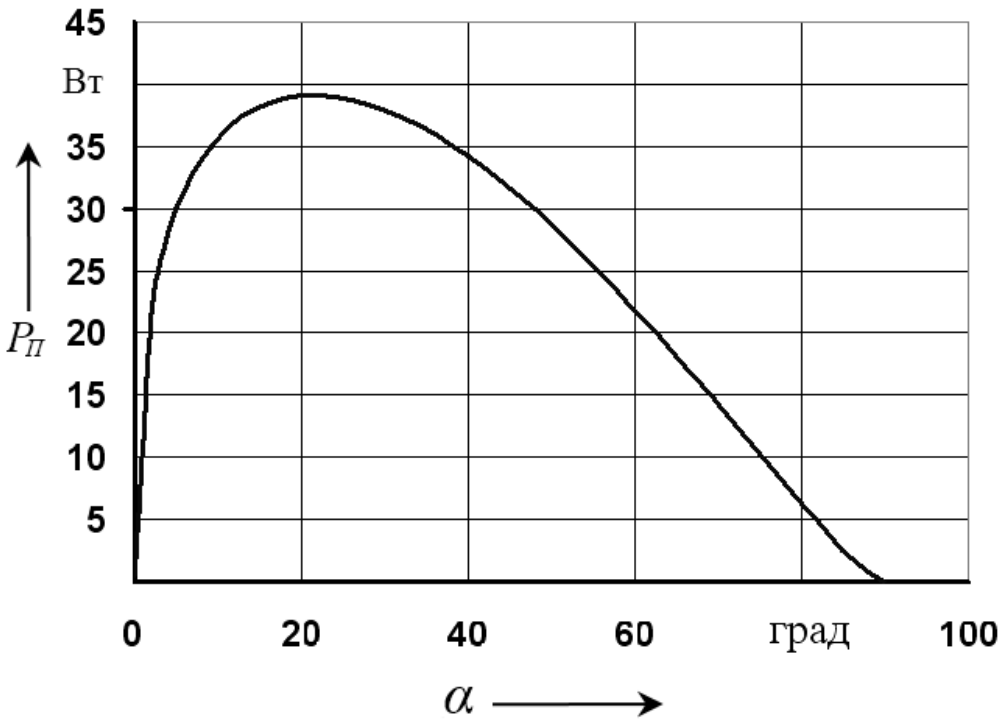


Рис. 6. Зависимость мощности, потребляемой выходным валом шлагбаума, от угла поворота стрелы

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/

Анализ графической зависимости, представленной на рис. 4, показывает, что экстремальные значения вертикальной составляющей реакции стрелы на выходной вал достигаются в моменты поворота стрелы на углы 0, 63 и 90°. Из рис. 5 видно, что максимальное воздействие суммарного момента стрелы на выходной вал происходит в начале подъема стрелы, а из рис. 6 – что максимальную мощность потребляет выходной вал привода шлагбаума в момент поворота стрелы на 24°. Этот факт подтверждает пользу наличия кулисного механизма в кинематической цепи разработанного привода в плавном изменении угловой скорости стрелы на угле ее подъема (см. рис. 3).

Результаты исследования модернизированного энергосберегающего привода шлагбаума

На основе результатов исследований функций (на угле от 0 до 90° поворота стрелы шлагбаума) угловой скорости, центробежной, вращательной, равнодействующей сил инерции, главного момента сил инерции, горизонтальной и вертикальной реакций на выходной вал привода, суммарных передаваемых валом момента и мощности скорректирована рабочая документация привода шлагбаума, по которой был изготовлен привод шлагбаума на основе энергосберегающей червячной передачи качения, описанный выше. С целью повышения пропускной способности шлагбаума уменьшено время подъема (опускания) стрелы с 4,6 до 3,2 с, для этого снижено передаточное отношение червячной передачи качения с 40 до 32 и уменьшено на 16 % передаточное отношение ременной передачи, в результате чего максимальная угловая скорость стрелы увеличилась с 0,37 (см. рис. 3) до 0,62 рад/с. При этом максимальная потребляемая от электродвигателя (АИР56А4 с P = 0,12 кВт и $n_{дв}$ = 1350 мин$^{-1}$) мощность доведена до 115,6 Вт. Максимум энергии потребляется при угле подъема стрелы, равном 22°. С целью дальнейшего снижения потерь энергии и улучшения условий технического обслуживания привода опоры скольжения выходного вала заменены подшипниками качения, изменено место расположения электродвигателя и конструкция натяжного устройства ременной передачи.

Привод шлагбаума, изготовленный по скорректированной рабочей документации, испытан на научно-производственном предприятии «ЭКОГРАД», с которым заключен лицензионный договор на передачу ноу-хау – «Конструкция и технология сборки привода шлагбаума на основе энергосберегающей червячной передачи качения». Шлагбаумы с такими приводами производились ООО «АЭРОВОДПРОМ».

Заключение

Шлагбаум, созданный на основе энергосберегающей червячной передачи качения, вызвал интерес потребителей и производства из-за двукратного снижения энергопотребления в сравнении с аналогами.

Проведенный анализ кинематических, динамических, силовых и энергетических зависимостей выходного звена от угла его поворота на 90° способствует научно обоснованному подходу к созданию и эксплуатации энергосберегающих шлагбаумов, более широкому внедрению энергосберегающих приводов в производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашкевич, М. Ф.** Червячные передачи качения / М. Ф. Пашкевич, Н. И. Рогачевский, С. Н. Рогачевский. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 137 с. : ил.

2. **Пискунов, Н. С.** Дифференциальное и интегральное исчисления : в 2 т. / Н. С. Пискунов. – Москва : Наука, 1978. – Т. 1. – 456 с. : ил.

Статья сдана в редакцию 28 апреля 2017 года

Николай Иванович Рогачевский, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-029-939-50-96.

Nikolai Ivanovich Rogachevsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-029-939-50-96.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/xmlui/