

Научная статья

УДК 531.3:631.362.3:621.313.282

doi: 10.17223/19988621/76/11

Математическое моделирование движения зерноочистительной машины с приводом от линейного электродвигателя

Марат Закиевич Нафиков¹, Ильнур Илдарович Загиров²,
Хасан Талхиевич Каримов³, Валерий Николаевич Пермяков⁴,
Ильшат Расимович Ахметьянов⁵

1, 2, 3, 4, 5 Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

¹ nafikovmz@rambler.ru

² zagirych22@mail.ru

³ carimov.ces@mail.ru

⁴ ir.perm@yandex.ru

⁵ ahmetir09@rambler.ru

Аннотация. Рассматривается механизм очистки зерновых смесей с приводом от линейного асинхронного электродвигателя. На основе уравнений Лагранжа выполнено математическое описание движения звеньев механизма. Найдена требуемая в соответствии с технологией очистки электромагнитная сила, создаваемая в обмотках линейного электродвигателя электронным коммутатором. При применении предлагаемого механизма создаются более благоприятные условия просеивания зерновой смеси по сравнению с традиционно используемыми машинами, приводимыми двигателями вращения.

Ключевые слова: зерноочистительная машина, линейный электродвигатель, уравнения Лагранжа, электродвижущая сила, электронный коммутатор

Для цитирования: Нафиков М.З., Загиров И.И., Каримов Х.Т., Пермяков В.Н., Ахметьянов И.Р. Математическое моделирование движения зерноочистительной машины с приводом от линейного электродвигателя // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 150–164. doi: 10.17223/19988621/76/11

Determination of electromagnetic force of a linear electric motor in the drive of a grain cleaning machine by modeling

Marat Z. Nafikov¹, Ilnur I. Zagirov², Xacan T. Karimov³,
Valery N. Permyakov⁴, Il'shat R. Akhmet'yanov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russian Federation

¹ nafikovmz@rambler.ru

² zagirych22@mail.ru

³ carimov.ces@mail.ru

⁴ ir.perm@yandex.ru

⁵ ahmetir09@rambler.ru

Abstract. An experimental mechanism for cleaning grain mixtures with a drive from a linear asynchronous electric motor has been developed and manufactured in the Bashkir State Agrarian University. More favorable conditions for sifting the grain mixture are created as a result of the use of an asynchronous linear electric motor for its drives in comparison with traditionally used machines driven by rotation motors. Based on the Lagrange equations, a mathematical description of the movement of the links of the mechanism is carried out and the electromagnetic force required in accordance with the cleaning technology is found. It is created in the windings of a linear electric motor by an electronic switch. It is found that the shape of the pulse of the required electromagnetic force is close to sinusoidal. However, it is possible to replace the electromotive force varying according to the sinusoidal law by a force constant in modulus and equal in impulse.

Keywords: grain cleaning machine, linear electric motor, Lagrange equations, electromotive force, electronic switch

For citation: Nafikov, M.Z., Zagirov, I.I., Karimov, Kh.T., Permyakov, V.N., Akhmet'yanov, I.R. (2022) Determination of electromagnetic force of a linear electric motor in the drive of a grain cleaning machine by modeling. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 76. pp. 150–164. doi: 10.17223/19988621/76/11

Введение

Традиционно сепарация зерновой смеси осуществляется на установках, приводимых асинхронными электродвигателями вращения [1, 2]. При этом технологический процесс просеивания осуществляют на резонансных режимах с относительно высокой частотой, малой амплитудой колебаний и при фиксированном угле наклона решет.

Такие зерноочистительные машины имеют недостатки, наиболее существенными из которых являются сложность конструкции, трудности запуска и остановки работы, повышенные динамические нагрузки на детали и узлы, вызванные высокочастотной вибрацией. При работе на высоких частотах вследствие большой инертности привода создается дополнительный динамический момент сопротивления, что приводит к увеличению потребления электроэнергии.

Имеются исследования и опытно-конструкторские разработки, в которых показано, что более благоприятные условия для просеивания зерновой смеси по сравнению с существующими машинами обеспечиваются при использовании режимов колебаний решет с относительно большими амплитудами (0.01 м и более) и малыми частотами (2–3 Гц и менее) [3, 4]. Способствуют качеству очистки периодическое изменение угла качания решет и перетряхивание зерновой смеси.

При указанных условиях существенно снижаются энергетические затраты на сепарацию зерновой смеси. Имеется возможность повысить качество разделения сыпучих смесей при использовании машин, допускающих регулируемые режимы колебаний. Поэтому создание управляемого привода для воспроизведения указанных параметров движения качающихся решет является актуальной задачей.

Другая важная задача – создание электропривода с автоколебаниями непосредственно от ротора электродвигателя, что позволяет существенно упростить конструкцию и снизить массоемкость зерноочистительной машины.

Достичь этого можно путем применения в управляемом приводе качающихся решет линейного синхронного или асинхронного электродвигателя [5]. В устройствах на основе таких электроприводов отпадает необходимость в массоемких и энергозатратных элементах: редукторе, устройстве преобразования вращательного движения в поступательное. Линейный асинхронный двигатель отличается простотой конструкции, технологичностью изготовления, легкостью монтажа и демонтажа, низкой ценой, надежностью и разнообразием конструктивного исполнения, более широкими возможностями управления.

Некоторые сложности применения линейных электродвигателей в различных областях связаны с необходимостью разработки электронного блока управления [5–7]. Такое устройство должно обеспечивать требуемый в соответствии с технологическими условиями работы машины закон движения ротора линейного электродвигателя относительно его статора.

Для создания устройства управления составляется математическая модель движения разрабатываемой машины. Во многих случаях для моделирования движения машины используют дифференциальные уравнения движения системы в обобщенных координатах (уравнения Лагранжа второго рода).

Цель исследования – разработка и исследование путем математического моделирования безредукторного механизма с приводом от линейного асинхронного электродвигателя, позволяющего воспроизводить и регулировать режимы колебаний решет большой амплитуды (0.1 м и более) и малой частоты (2–3 Гц и менее) без остановки процесса сепарации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие конкретные задачи исследования:

- 1) выбрать кинематическую схему механизма привода решетного стана, определить его рациональные геометрические и кинематические параметры;
- 2) рассмотреть динамику очистительной машины и составить математическую модель ее движения;
- 3) получить выражение управляющей силовой функции (электромагнитной силы) линейного асинхронного электродвигателя.

Методика исследования. Применена аналитическая методика исследования, основанная на законах и положениях теоретической механики и теории механиз-

мов и машин. В частности, для исследования динамики механизма с одной степенью свободы составлялось уравнение Лагранжа второго рода.

Поскольку в данном исследовании определялась силовая управляющая функция, создаваемая блоком управления электродвигателя, то в качестве обобщенной координаты был выбран ход h его ротора относительно статора.

Расчетная схема

В Башкирском ГАУ на базе цилиндрического линейного асинхронного электродвигателя был спроектирован и изготовлен опытный вариант механизма качающегося сепаратора [8]. На рис. 1 приведена его кинематическая и расчетная схема.

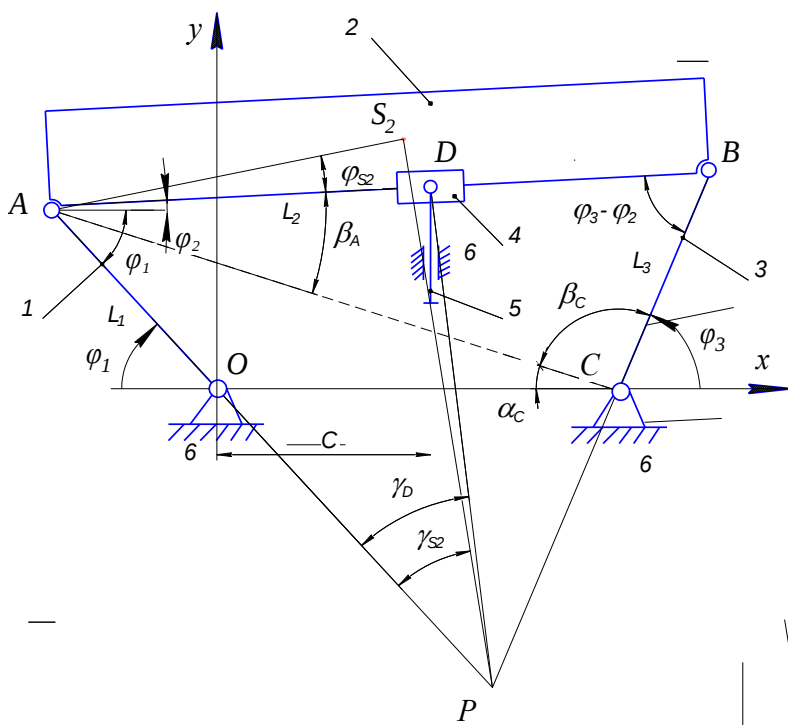


Рис. 1. Схема механизма привода качающегося сепаратора

Fig. 1. Oscillating separator drive mechanism diagram

Механизм состоит из пяти подвижных звеньев и стойки: 1 – коромысло; 2 – шатун, выполненный как одно звено с ротором электродвигателя; 3 – коромысло; 4 – ползун, составляющий одно звено со статором двигателя; 5 – штанга. Коромысла 1 и 3 совершают вращательные движения соответственно вокруг неподвижных осей O и C ; шатун 2 движется плоскопараллельно; ползун 4 также движется плоскопараллельно, вращаясь вместе с шатуном 2 и перемещаясь относительно него поступательно; статор 4 мотора закреплен на движущейся поступательно штанге 5; 6 – неподвижная стойка (корпус механизма). Механизм качающегося

сепаратора приводится линейным электродвигателем в соответствии с законом, заданным коммутатором (электронным блоком управления).

Геометрические размеры показанного на рис. 1 плоского пятизвенного механизма с одной степенью свободы, определенные предварительными расчетами, равны: $OA = L_1 = 0.056$ м, $AB = L_2 = 1$ м, $BC = L_3 = 0.059$ м, $OC = 0.028$ м, $c = 0.014$ м. Положение центра тяжести качающегося сита S_2 определяется указанными на схеме параметрами: $AS_2 = 0.5$ м, $\varphi_{S_2} = 20^\circ$.

Определены также характеристики инертности звеньев: $I_{1A} = 0.004$ кгм², $I_{2S} = 2.0$ кгм², $I_{3C} = 0.005$ кгм², $I_{4S} = 0.1$ кгм², $m_2 = 100$ кг, $m_4 = 20$ кг, $m_5 = 10$ кг.

Угловые координаты звеньев φ_1 , φ_2 , φ_3 и положительные направления их отсчета показаны на рис. 1, мгновенный центр скоростей звена 2 обозначен на схеме как P .

Частота колебаний и ход ротора линейного электродвигателя относительно его статора обеспечиваются настройкой коммутатора – электронного блока управления машиной. Был выбран гармонический колебательный закон движения ротора электродвигателя, обеспечиваемый коммутатором:

$$h = a \cdot \sin(k \cdot t), \quad (1)$$

где a – амплитуда колебательного движения ротора; k – частота его колебаний.

В последующих вычислениях принимались значения $a = 0.1$ м, $k = 12$ рад/с.

Вычисление геометрических параметров механизма

Составляем, пользуясь расчетной схемой на рис. 1, следующие геометрические соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta OAS. \quad \alpha_c &= \tan^{-1} \left(\frac{L_1 \cdot \sin \varphi_1}{OC + L_1 \cdot \cos \varphi_1} \right), \quad AC = L_1 \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\cos \alpha_c}. \\ \Delta ABC. \quad \beta_c &= \cos^{-1} \left(\frac{L_2^2 + AC^2 - L_3^2}{2 \cdot AC \cdot L_3} \right), \quad \beta_A = \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + AC^2}{2 \cdot AC \cdot L_2} \right). \\ \varphi_2 &= \beta_A - \alpha_c, \quad \varphi_3 = \pi - \beta_c - \alpha_c. \\ \Delta ABP. \quad AP &= L_2 \cdot \frac{\sin(\varphi_3 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_1 + \varphi_3)}, \quad BP = L_2 \cdot \frac{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{\sin(\varphi_1 + \varphi_3)}. \\ \Delta ADP. \quad AD &= \frac{L_1 \cdot \cos \varphi_1 + c}{\cos \varphi_2}, \quad DP = \sqrt{AP^2 + AD^2 - 2AP \cdot AD \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}. \\ \gamma_D &= \sin^{-1} \left(\frac{AD}{DP} \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \right). \\ \Delta APS_2. \quad PS_2 &= \sqrt{AP^2 + AS_2^2 - 2AP \cdot AS_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_{S_2})}. \end{aligned} \quad (2)$$

Ордината точки D , принадлежащей звеньям 4 и 5, равна

$$\gamma_D = L_1 \cdot \sin \varphi_1 + AD \cdot \sin \varphi_2. \quad (3)$$

Результаты вычислений по зависимостям (2), (3) сведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры исследуемого механизма

№ п.п.	φ_1 , град	φ_2 , град	φ_3 , град	γ_{S2} , рад	PS_2 , мм	γ_D , мм	AP , мм	BP , мм	AD , мм	h , мм
1	30	16.05	70.59	0.631	774.79	459.80	828.67	732.43	650.32	–
2	40	9.23	61.88	0.635	788.58	452.43	812.36	773.92	576.45	–100.00
3	45	5.76	57.27	0.638	792.30	450.05	801.06	792.62	538.70	–62.25
4	50	2.24	52.49	0.643	793.64	448.50	787.48	809.69	500.34	–23.89
5	53.07	0.037	49.45	0.647	793.21	447.98	777.95	819.29	476.45	0
6	55	–1.36	47.51	0.650	792.44	447.81	771.50	824.94	461.33	15.12
7	60	–5.03	42.23	0.659	788.53	448.02	753.02	838.22	421.62	54.83
8	65	–8.80	36.94	0.670	781.81	449.23	732.00	849.38	381.15	95.30
9	65.57	–9.24	36.30	0.672	780.86	449.84	729.42	850.52	376.45	100.00
10	70	–12.69	31.31	–	772.19	451.60	708.40	858.33	339.83	–
11	75	–16.71	25.43	–	759.60	455.37	682.26	865.01	297.50	–
12	80	–20.90	19.27	–	744.04	460.89	653.63	869.40	253.96	–
13	90	–29.91	5.97	–	704.14	479.46	589.27	871.53	161.51	–
14	100	–40.04	–8.96	–	653.15	515.56	516.39	865.79	55.85	–
15	110	–51.82	–26.13	–	592.30	591.75	436.00	854.63	–83.36	–
16	120	–66.15	–46.73	–	523.40	801.60	347.10	843.21	–346.2	–
Примечание. Жирным шрифтом показан рабочий диапазон										

На рис. 2 показаны зависимости углов качания звеньев 2 и 3, а также относительного положения шарнира D на шатуне AB от угловой координаты φ_1 коромысла OA .

Анализируя полученные результаты вычислений, выбираем рабочий диапазон исследуемого экспериментально-лабораторного механизма. При значениях хода ротора относительно статора $h = \pm 0.1$ м угол качания звена 1 меняется в пределах $40^\circ \leq \varphi_1 \leq 65.6^\circ$, чем обеспечиваются благоприятные углы давления в шарнире A . Также удовлетворительные значения имеет угол давления в шарнире B . В выбранном рабочем диапазоне угол качания решетки сепаратора φ_2 периодически меняется в пределах от 9.23° до -9.23° , т.е. в диапазоне, рекомендованном в литературных источниках [3, 4].

В механизме амплитуда линейного колебательного движения исполнительного второго звена соответствует ходу h ротора электродвигателя.

В проводимых исследованиях нам более интересны зависимости геометрических параметров механизма не от угла φ_1 , а от обобщенной координаты h (рис. 3).

В результате анализа расчетных данных из табл. 1 установлено, что углы качания φ_1 , $\varphi_2 = \varphi_4$, φ_3 звеньев механизма в пределах его рабочего диапазона меняются линейно, подчиняясь зависимостям

$$\varphi_1 = 2.227 \cdot h + 0.924, \quad \varphi_2 = -1.613 \cdot h + 0.0003, \quad \varphi_3 = -2.241 \cdot h + 0.860. \quad (4)$$

В уравнениях (4), которые в дальнейшем будем называть эмпирическими, ход h в метрах, углы φ в радианах.

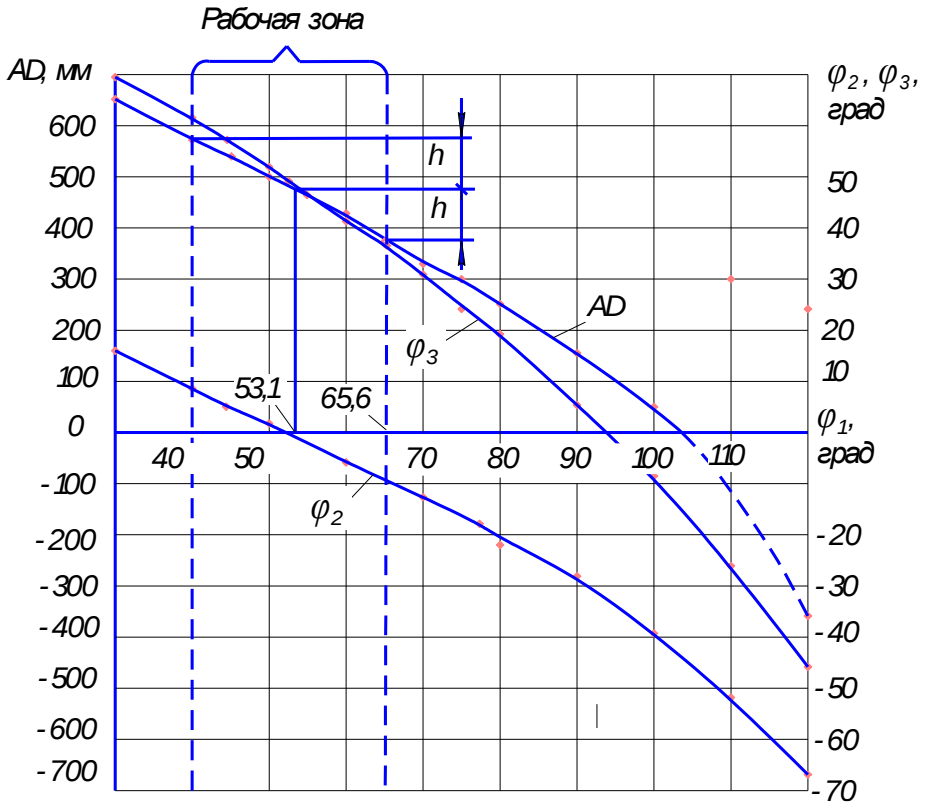


Рис. 2. Зависимости геометрических параметров механизма от положения звена 1
Fig. 2. Dependences of geometric parameters of the mechanism on the position of link 1

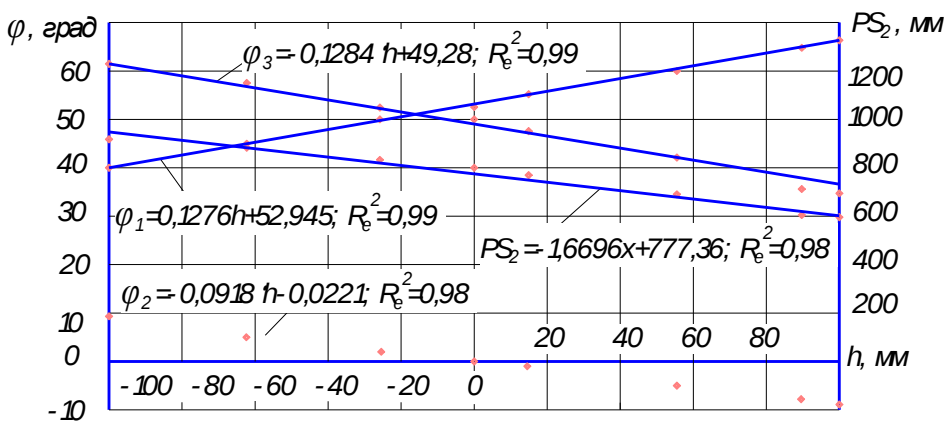


Рис. 3. Зависимости углов положений звеньев механизма от хода h ротора линейного электродвигателя
Fig. 3. Dependences of position angles of the mechanism links on the stroke of the rotor of the linear electric motor

Аналогичным образом в результате статистической обработки данных, представленных в табл. 1, получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} PS_2 &= -0.0484 \cdot h + 0.7894, \quad \gamma_D = 0.3 \cdot h^2 - 0.0142 \cdot h + 0.448, \\ \gamma_{S2} &= 0.1911 \cdot h + 650. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь также линейные размеры в метрах, угол γ_{S2} в радианах.

Расстояние DP в выбранном рабочем диапазоне изменяется незначительно – от 0,617 до 0,622 м.

Значения геометрических параметров механизма, вычисленные по эмпирическим зависимостям (4), (5), практически не отличаются от данных в табл. 1.

Определение линейных и угловых скоростей

Исходя из эмпирических уравнений (4), (5) определялись линейные и угловые скорости механизма как функции от обобщенной скорости, времени, а также обобщенной координаты.

Зависимости скоростей звеньев от обобщенной скорости $\dot{h}$ получаем дифференцированием эмпирических соотношений (4):

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 2.227 \cdot \dot{h}, \quad \omega_2 = -1.613 \cdot \dot{h}, \quad \omega_3 = -2.241 \cdot \dot{h}, \\ v_{S2} &= \omega_2 \cdot PS_2 = -1.613 \cdot \dot{h} \cdot \left(-0.0484 \cdot \frac{\sqrt{a^2 \cdot k^2 - h^2}}{k} + 0.789 \right), \\ v_{S4} &= v_{S5} = \dot{\gamma}_D = \dot{h} \cdot \left(0.6 \cdot \frac{\sqrt{k^2 \cdot \alpha^2 - h^2}}{k} \cdot \dot{h} - 0.0142 \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь обобщенная координата равна $h = a \cdot \sin(k \cdot t)$, обобщенная скорость $\dot{h} = a \cdot k \cdot \cos(k \cdot t)$. Перепишем выражения (6) для скоростей как функции времени:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 2.227 \cdot a \cdot k \cdot \cos(k \cdot t), \quad \omega_2 = -1.613 \cdot a \cdot k \cdot \cos(k \cdot t), \\ \omega_3 &= -2.241 \cdot a \cdot k \cdot \cos(k \cdot t), \\ v_{S2} &= 0.0390 \cdot a^2 \cdot k \cdot \sin(2k \cdot t) - 0.0142 \cdot a \cdot k \cdot \cos(k \cdot t), \\ v_{S4} &= v_{S5} = 0.3 \cdot a^2 \cdot k \cdot \sin(2k \cdot t) - 0.0142 \cdot a \cdot k \cdot \cos(k \cdot t). \end{aligned} \quad (7)$$

Также выражаем скорости звеньев механизма как функции обобщенной координаты h :

$$\begin{aligned} \dot{h} &= k \cdot \sqrt{a^2 - h^2}, \quad \omega_1 = 2.227 \cdot k \cdot \sqrt{a^2 - h^2}, \\ \omega_2 &= -1.613 \cdot k \cdot \sqrt{a^2 - h^2}, \quad \omega_3 = -2.241 \cdot k \cdot \sqrt{a^2 - h^2}, \\ v_{S2} &= -1.613 \cdot k \cdot \sqrt{a^2 - h^2} \cdot (-0.0484 \cdot h + 0.789), \\ v_{S4} &= v_{S5} = 0.6 \cdot k \cdot \sqrt{a^2 - h^2} \cdot (h - 0.0142). \end{aligned} \quad (8)$$

Для проверки правильности и точности вычислений эти же скорости в исследовании [8] определяли и традиционным способом [9], предусматривающим постро-

ение планов скоростей и составление передаточных отношений. Расхождение результатов, определенных различными способами, не превышает 2–3%.

Определение кинетической энергии механизма

С учетом характера движения звеньев механизма составлено выражение для вычисления его кинетической энергии:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5,$$

$$T = \frac{1}{2} I_{10} \cdot \omega_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_{s2}^2 + \frac{1}{2} I_{2s} \cdot \omega_2^2 + \frac{1}{2} I_{3c} \cdot \omega_3^2 + \frac{1}{2} m_4 \cdot v_{s4}^2 + \frac{1}{2} I_{4s} \cdot \omega_4^2 + m_5 \cdot v_{s5}^2. \quad (9)$$

Результаты вычислений кинетических энергий звеньев и всего рычажного механизма приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимости кинетических энергий звеньев и механизма в целом от обобщенной координаты и обобщенной скорости

№ п.п.	h , м	v_{D2D} , м/с	T_1 , Дж	$T_{2П}$, Дж	$T_{2ВР}$, Дж	T_3 , Дж	$T_{4П}$, Дж	$T_{4ВР}$, Дж	T_5 , Дж	T , Дж
1	0	1.200	0.014	116.58	3.747	0.018	0.003	0.187	0.001	120.6
2	0.050	1.039	0.011	86.896	2.810	0.014	0.003	0.140	0.001	89.86
3	0.087	0.600	0.006	28.835	0.937	0.005	0.005	0.047	0.003	29.83
4	0.100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.087	–0.600	0.006	28.835	0.937	0.005	0.005	0.047	0.003	29.83
6	0.050	–1.039	0.011	86.896	2.810	0.014	0.003	0.140	0.001	89.86
7	0	–1.200	0.014	116.58	3.747	0.018	0.003	0.187	0.001	120.6
8	–0.050	–1.039	0.011	86.896	2.810	0.014	0.003	0.140	0.001	89.86
9	–0.087	–0.600	0.006	28.835	0.937	0.005	0.005	0.047	0.003	29.83
10	–0.100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	–0.087	0.600	0.006	28.835	0.937	0.005	0.005	0.047	0.003	29.83
12	–0.050	1.039	0.011	86.896	2.810	0.014	0.003	0.140	0.001	89.86
13	0	1.200	0.014	116.58	3.747	0.018	0.003	0.187	0.001	120.6

Расчеты показали, что в наибольшей степени на кинетическую энергию механизма влияет кинетическая энергия T_2 исполнительного звена, а слагаемые T_1 , T_3 , T_4 и T_5 , входящие в выражение (9), пренебрежимо малы.

С учетом сказанного и с учетом соотношений (6) зависимость кинетической энергии механизма от обобщенной координаты h и обобщенной скорости $\dot{h}$ будет иметь вид:

$$T \approx T_2 = \frac{1}{2} m_2 \cdot v_{s2}^2 + \frac{1}{2} I_{s2} \cdot \omega_2^2 = 130,1 \cdot \dot{h}^2 \cdot (0,0484 \cdot h - 0,789)^2 + 2,602 \cdot h^2. \quad (10)$$

Составление уравнения Лагранжа

Уравнение Лагранжа составляем в форме

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{h}} \right) - \frac{\partial T}{\partial h} = Q_h. \quad (11)$$

Производные в левой его части равны:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{h}} &= 260.2 \cdot \dot{h} \cdot (0.0484 \cdot h - 0.789)^2, \quad \frac{\partial T}{\partial h} = 12.59 \cdot \dot{h} \cdot (0.0484 \cdot h - 0.789), \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{h}} \right) &= 260.2 \cdot (0.0484 \cdot h - 0.789) \cdot \ddot{h} + 260.2 \cdot \dot{h} \cdot 2 \cdot (0.0484 \cdot h - 0.789) \cdot \dot{h}, \\ \dot{h} &= k \cdot \sqrt{a^2 - h^2}, \quad \ddot{h} = -\frac{k \cdot n \cdot h}{\sqrt{a^2 - h^2}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для определения обобщенной силы Q_h составляем расчетную схему. На рис. 4 показано звено 2 механизма, на которое действуют сила тяжести $\overline{m_2 g}$, электромагнитная сила $\overline{F}$, действующая между обмотками ротора и статора электродвигателя и направленная по линии AB . Реакции $\overline{R}_{12}$, $\overline{R}_{32}$ на звено 2 соответственно со стороны звеньев 1 и 3, весом которых пренебрегаем, направлены по стержням OA и BC . Массы звеньев 4 и 5 также пренебрежимо малы, поэтому реакция $\overline{R}_{42} \approx 0$.

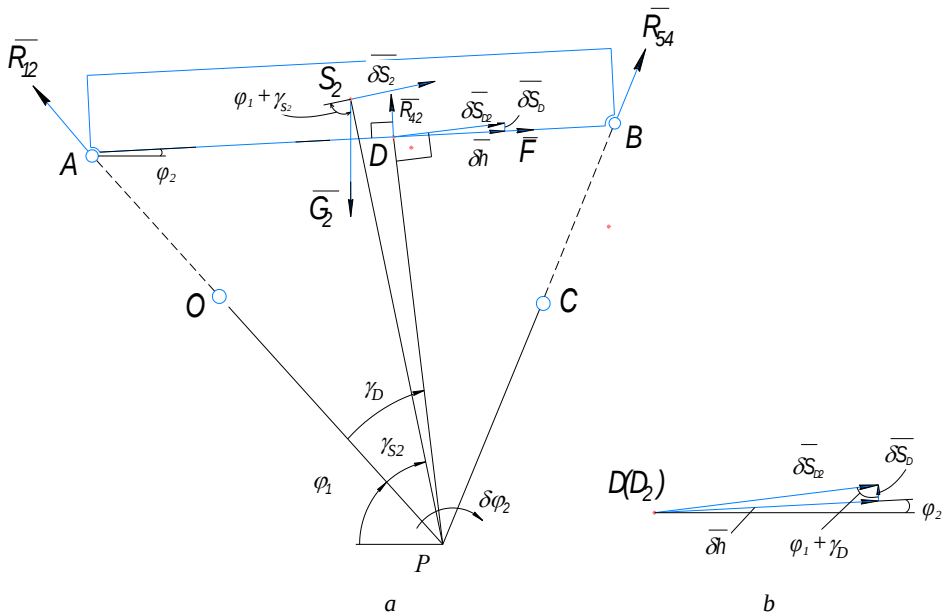


Рис. 4. К определению обобщенной силы: *a* – действующие на второе звено силы и малые перемещения его точек; *b* – перемещение точки D

Fig. 4. To the definition of the generalized force: (a) forces acting on the second link and small displacements of its points and (b) moving point D

Выразим перемещения точек приложения действующих на шатун 2 активных сил $\bar{F}$ и $\overline{m_2 g}$ через вариацию δh обобщенной координаты.

При повороте звена 2 вокруг его мгновенного центра скоростей P на малый угол $\delta\varphi_2$ центр тяжести S_2 и точка D получают элементарные перемещения, связанные соотношением $\delta S_2 = \delta_{D2} \cdot PS_2 / DP$. Из векторного треугольника на рис. 4, б получим

$$\delta S_{D2} \cdot \sin(\varphi_1 + \gamma_D) = \delta h \cdot \cos \varphi_2.$$

Таким образом,

$$\delta S_{D2} = \frac{\delta h \cdot \cos \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \gamma_D)}, \quad \delta_{S2} = \delta h \cdot \frac{PS_2}{DP} \cdot \frac{\cos \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \gamma_D)}. \quad (13)$$

Активные силы $\bar{G}_2$ и $\bar{F}$, действующие на шатун, на вариации обобщенной координаты совершают малые работы:

$$\begin{aligned} \delta A = \delta A(\bar{F}) + \delta A(\bar{G}_2) &= F \cdot \delta h - m_2 g \cdot \delta S_2 \cdot \cos(\varphi_1 + \gamma_{S2}) = \\ &= \left[F - m_2 g \cdot \frac{PS_2}{DP} \cdot \frac{\cos(\varphi_1 + \gamma_{S2}) \cdot \cos \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \gamma_D)} \right] \cdot \delta h. \end{aligned} \quad (14)$$

Отсюда обобщенная сила равна в уравнении Лагранжа (11) равна

$$Q_h = F - m_2 g \cdot \frac{PS_2}{DP} \cdot \frac{\cos(\varphi_1 + \gamma_{S2}) \cdot \cos \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \gamma_D)}. \quad (15)$$

Обсуждение результатов

Из уравнения Лагранжа (11) с учетом (12), (15) получим выражение для управляющей силовой функции F (электромагнитной силы линейного асинхронного электродвигателя)

$$F = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{h}} \right) - \frac{\partial T}{\partial h} + m_2 g \cdot \frac{PS_2}{DP} \cdot \frac{\cos(\varphi_1 + \gamma_{S2}) \cdot \cos \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \gamma_D)}. \quad (16)$$

Были выполнены многократные вычисления по выражениям (11), (12) и построен график зависимости электромагнитной силы от времени в диапазоне одного периода (рис. 5).

Если посредством коммутатора в обмотках электродвигателя создается сила, меняющаяся по установленному (близкому к синусоидальному) закону, обеспечивается требуемый закон движения исполнительного звена 2 машины и происходит эффективная очистка зерновой смеси.

Однако создание такого управляющего электронного устройства, обеспечивающего синусоидальное изменение электродвижущей силы, является достаточно сложной технической задачей. На практике в большинстве случаев применяют более простое и дешевое устройство, обеспечивающее постоянное по модулю значение электродвижущей силы, показанное на рис. 5 пунктирной линией. Значение постоянной электродвижущей силы определяется из условия равенства за полупериоды $T/2$ импульсов (соответствующих площадям подынтегральных линий) вычисленной и заменяющей сил.

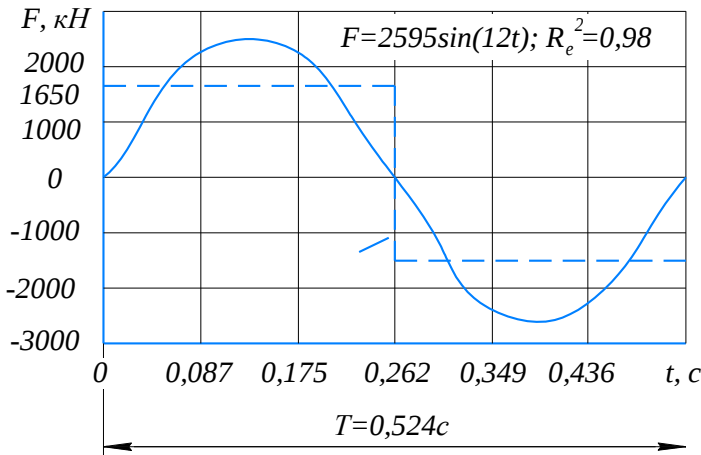


Рис. 5. Изменение электромагнитной силы линейного электродвигателя
Fig. 5. Variation in the electromagnetic force of a linear electric motor

Как показывает опыт создания технологических машин с приводом от линейного асинхронного электродвигателя, такая замена закона изменения электро-движущей силы на показателях их работы существенно не отражается [10, 11].

Закключение

1. Предложена кинематическая схема и изготовлен опытно-лабораторный экземпляр механизма качающегося сепаратора для просеивания зерновой смеси. В результате применения для его привода асинхронного линейного электродвигателя создаются более благоприятные условия просеивания зерновой смеси по сравнению с существующими машинами, приводимыми двигателями вращения. Достоинствами разрабатываемого механизма являются возможность безостановочного регулирования режимов колебательного плоскопараллельного движения решетных станов (амплитуды, частоты и углов качания), снижение энергоемкости процесса сепарации зерновой смеси, отсутствие необходимости применения энергозатратных, массоемких элементов привода (редуктора, устройства преобразования вращательного движения в поступательное и др.).

2. Предложено для системы с одной степенью свободы в качестве обобщенной координаты, определяющей положения звеньев механизма, использовать перемещение ротора линейного электродвигателя относительно его статора. Определены линейные и угловые скорости звеньев рычажного механизма в зависимости от обобщенной координаты h и обобщенной скорости $\dot{h}$. Составлены выражения кинетической энергии механизма в форме уравнений (10), (11), что удобно для составления входящих в уравнения Лагранжа частных производных $\partial T / \partial h$ и $\partial T / \partial \dot{h}$.

3. Найдена из уравнения Лагранжа второго рода требуемая электромагнитная сила, создаваемая в обмотках линейного электродвигателя электронным коммутатором. По форме импульс требуемой электромагнитной силы близок к синусоидальному.

4. Показано, что возможна замена меняющейся по синусоидальному закону электродвижущей силы на постоянную по модулю и равную по импульсу силу. В этом случае упрощается и удешевляется электронное коммутирующее устройство, а на эффективности очистки зерновой смеси такая замена существенно не отражается.

Список источников

1. Babic M., Babic L. Influence of basic wheat grain physical properties onto hydrodinamical regimes // AgEng. Madrid, 23–26 September 1996. Paper 96F–067.
2. Bohnet M. Mechanische Verfahrenstechnik. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. 270 S.
3. Быков В.С. Повышение эффективности процесса сепарирования зерновых смесей на плоских качающихся решетках : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01. Воронеж, 1999. 422 с.
4. Корнев А.С., Оробинский В.И., Сундеев А.А. Повышение эффективности работы плоских решет, решетных станков зерноочистительных машин // Инновационные технологии и технические средства для АПК. 2014. Ч. III. С. 84–89.
5. Linenko A.V., Gabitov I.I., Baynazarov V.G., Tuktarov M.F., Aipov R.S., Akchurin S.V., Kamalov T.I., Badretdinov I.D., Leontiev D.S., Vokhmin V.S. The mechatronic module “linear electric drive – sieve boot” intelligent control system of grain cleaner // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25 (3). P. 708–717.
6. Michalczyk J., Cieplik G. Maximal amplitudes of vibrations of the suspended screens, during the transient resonance // Archives of Mining Sciences. 2016. V. 61 (3). P. 537–552.
7. Аипов Р.С., Линенко А.В. Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин. Уфа : Башкирский ГАУ, 2013. 308 с.
8. Nafikov M.Z., Gabitov I.I., Aipov R.S., Akchurin S.V., Ahmetianov I.R., Zagirov I.I. Kinematic parameters of the swinging separator driven by linear electric motor // Journal of the Balkan tribological association. 2019. V. 25 (3). С. 832–844.
9. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин : учебник для вузов. М. : Наука, 1988. 640 с.
10. Aipov R.S., Linenko A.V., Tuktarov M.F., Bainazarov V.G. Analysis of pulsed operating mode of linear induction drive of grain cleaning // Proceedings of the International Conference “Actual Issues of Mechanical Engineering” 2017 (AIME 2017). P. 420–424.
11. Туктаров М.Ф., Байназаров В.Г., Махмудов Р.Ф., Яруллин Р.Б. Управление линейным электроприводом зерноочистительной машины // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2020. № 2 (54). С. 131–138.

References

1. Babic M., Babic L. (1996) Influence of basic wheat grain physical properties onto hydrodynamical regimes. *AgEng '96 International Conference on Agricultural Engineering', Madrid, 23–26 September 1996*, Paper 96 F – 067.
2. *Mechanische Verfahrenstechnik* (2004) Ed. by Bohnet M. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
3. Bykov V.S. (1999) *Povysheniye effektivnosti protsessa separirovaniya zernovykh smesey na ploskikh kachayushchikhsya reshetakh*. [Improving the efficiency of the process of separating grain mixtures on flat swinging sieves]. Dissertation. Voronezh.
4. Kornev A.S., Kornev A.S., Orobinskiy V.I., Sundeyev A.A. (2014) *Povyshenie effektivnosti raboty ploskikh reshet, reshetnykh stanov zernoochistitel'nykh mashin*. [Improving the efficiency of flat sieves, sieve mills of grain cleaning machines]. *Innovatsionnyye tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva dlya APK. Chast' III*. pp. 84–89.

5. Linenko A.V., Gabitov I.I., Baynazarov V.G., Tuktarov M.F., Aipov R.S., Akchurin S.V., Kamalov T.I., Badretdinov I.D., Leontiev D.S., Vokhmin V.S. (2019) The mechatronic module “linear electric drive – sieve boot” intelligent control system of grain cleaner. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 25(3). pp. 708–717.
6. Michalczyk J., Cieplak G. (2016) Maximal amplitudes of vibrations of the suspended screens, during the transient resonance. *Archives of Mining Sciences*. 61(3). pp. 537–552.
7. Aipov P.S., Linenko A.V. (2013) *Lineynyye elektricheskiye mashiny i lineynyye asinkhronnyye elektropriivody tekhnologicheskikh mashin* [Linear electric machines and linear asynchronous electric drives of technological machines]. Ufa: Bashkir State Agrarian University.
8. Nafikov M.Z., Gabitov I.I., Aipov R.S., Akchurin S.V., Ahmetianov I.I., Zagirov I.R. (2019) Kinematic parameters of the swinging separator driven by a linear electric motor. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 25(3). pp. 832–844.
9. Artobolevskiy I.I. (1988) *Teoriya mekhanizmov i mashin*. [Theory of mechanisms and machines]. Moscow: Nauka.
10. Aipov R.S., Linenko A.V., Tuktarov M.F., Bainazarov V.G. (2017) Analysis of pulsed operating mode of linear induction drive of grain cleaning. *Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" 2017 (AIME 2017)*. pp. 420–424.
11. Tuktarov M.F., Baynazarov V.G., Makhmutov R.F., Yarullin R.B. (2020) Upravlenie lineinym elektropriivodom zernoochistitel'noy mashiny [Control of the linear electric drive of the grain cleaning machine]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 54(2). pp. 131–138.

Сведения об авторах:

Нафиков Марат Закиевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики и конструирования машин Башкирского государственного аграрного университета (Уфа, Россия). E-mail: nafikovmz@rambler.ru

Загиров Ильнур Илдарович – кандидат технических наук, доцент кафедры механики и конструирования машин Башкирского государственного аграрного университета (Уфа, Россия). E-mail: zagiryh22@mail.ru.

Каримов Хасан Талхиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры механики и конструирования машин Башкирского государственного аграрного университета (Уфа, Россия). E-mail: carimov.ces@mail.ru.

Пермяков Валерий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры механики и конструирования машин Башкирского государственного аграрного университета (Уфа, Россия). E-mail: ir.perm@yandex.ru.

Ахметьянов Ильшат Расимович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики и конструирования машин Башкирского государственного аграрного университета (Уфа, Россия). E-mail: ahmetir09@rambler.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Nafikov Marat Zakievich (Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanics and Machine Design, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russian Federation). E-mail: nafikovmz@rambler.ru

Zagirov Ilnur Ildarovich (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Machine Design, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russian Federation). E-mail: zagiryh22@mail.ru

Karimov Xacan Talxievich (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Machine Design, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russian Federation). E-mail: carimov.ces@mail.ru

Permyakov Valery Nikolaevich (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair of mechanics and engineering graphics, of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, Russian Federation). E-mail: ir.perm@yandex.ru

Akhmet'yanov Il'shat Rasimovich (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair of mechanics and engineering graphics, of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, Russian Federation). E-mail: ahmetir09@rambler.ru

***Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.***

Статья поступила в редакцию 08.12.2021; принята к публикации 22.03.2022

The article was submitted 08.12.2021; accepted for publication 22.03.2022