

УДК 621.313

UDC 621.313

05.00.00 Технические науки

Technical science

ИССЛЕДОВАНИЕ САМОУРАВНОВЕШЕННОЙ КАРТОФЕЛЕСОРТИРОВАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**THE STUDY OF SELF-BALANCED POTATO SORTING MACHINE WITH LINEAR INDUCTION DRIVE**

Линенко Андрей Владимирович
д.т.н., доцент
SPIN-код=9445-2368
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа, Россия
Linenko-bsau@yandex.ru

Lynenko Andrey Vladimirovich
Dr.Sci.Tech., associate professor
SPIN code=9445-2368
FSBEI "Bashkir State Agrarian University", Ufa, Russia
Linenko-bsau@yandex.ru

Байназаров Валинур Галинурович
аспирант
SPIN-код= 7759-0344
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа, Россия
baynazv@mail.ru

Baynazarov Valinur Galinurovich
postgraduate student
SPIN code=7759-0344
FSBEI "Bashkir State Agrarian University", Ufa, Russia
baynazv@mail.ru

Камалов Тимур Ильдусович
аспирант
SPIN-код=3786-7896
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа, Россия
g00dy88@mail.ru

Kamalov Timur Ildusovich
postgraduate student
SPIN code=3786-7896
FSBEI HE "Bashkir State Agrarian University", Ufa, Russia
g00dy88@mail.ru

В данной статье рассматривается самоуравновешенная картофелесортировальная установка, отличающаяся от существующих конструкций инерционных самоуравновешенных сортировальных установок с колебательным электроприводом тем, что в приводе применяется линейный асинхронный двигатель. В качестве уравновешивающего устройства применен метод дублирующего механизма. Дублирующий механизм является зеркальным отражением основного рабочего органа, и также участвует в технологическом процессе. Его применение в приводе установки позволяет не только повысить эффективность очистки, сушки и сортировки картофеля, но и повысить надежность сортировальной установки, что соответствует новейшим тенденциям развития техники. Приводится математическая модель предложенного электропривода картофелесортировальной установки, которая реализована в среде объектно-визуального моделирования Matlab [Simulink]. Математическая модель позволяет в динамике исследовать влияние параметров линейного асинхронного электропривода на параметры колебательного процесса рабочего органа. Разработанная методика исследования и созданная экспериментальная картофелесортировальная установка с линейным асинхронным электроприводом подтвердили теоретические исследования. Определены основные кинематические размеры установки и технические параметры отдельных узлов. Показано, что КПД инерционного

In the article we have considered the self-balanced potato sorting machine differing from existing designs of self-balanced potato sorting machines with an oscillatory electric drive. That drive uses a linear induction motor. As the counterbalancing device, the method of the duplicating mechanism is applied. The duplicating mechanism is a specular reflection of the main working body, and also participates in technological process. Its application in the drive of machine allows not only to increase efficiency of cleaning, drying and sorting of potatoes, but also to increase reliability of sorting installation that corresponds to the newest tendencies of development of technology. We have brought the mathematical model of the offered electric drive of potato sorting machine, which is implemented in the environment of object and visual modeling of Matlab [Simulink]. The mathematical model allows investigating influence of parameters of the linear induction electric drive on parameters of oscillatory process of working body in dynamics. The developed technique of research and the created experimental potato sorting machine with the linear induction drive have confirmed theoretical researches. The main kinematic sizes of machine and technical parameters of individual nodes are determined. It is shown, that the efficiency of inertial transportation can be increased for 20% in comparison with the classical drive from the motor of rotation. Results of research will allow to realize energetically and technologically effective potato sorting machines with the linear induction drive

транспортирования можно повысить на 20% по сравнению с классическим приводом от двигателя вращения. Результаты исследования позволят реализовывать энергетически и технологически эффективные самоуравновешенные картофелесортировальные установки с линейным асинхронным электроприводом

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, КОЛЕБАНИЯ, СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ, МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Keywords: ELECTRIC DRIVE, LINEAR INDUCTION MOTOR, OSCILLATIONS, COMPOUND MOTION, METHOD OF CALCULATION

Существующее технологическое оборудование, обеспечивающее сортировку и очистку картофеля в соответствии с агротехнологическими требованиями, имеет сложную конструкцию, и, как следствие, это отражается на его надежности [1]. Повысить надежность и упростить конструкцию таких машин можно за счет применения линейных асинхронных электроприводов (ЛЭП) [2,3]. Посредством ЛЭП совместно с упругими элементами можно легко осуществить инерционное транспортирование картофеля по рабочему органу, выполненного из участков очистки и сортировки [4,5]. При этом возникает проблема уравнивания возвратно-поступательно движущихся масс, что присуще всему технологическому оборудованию такого рода. Среди технических средств уравнивания механизмов известен метод дублирующего механизма, заключающийся в добавлении уравнивающего механизма, являющегося зеркальным отражением уравниваемого. Такие механизмы называются самоуравновешенными, в них может быть достигнута полная уравновешенность [6,7]. Такой подход уравнивания механизмов применяется для механизмов с приводом от двигателя вращения, а в статье рассматривается самоуравновешенная система с приводом от линейного асинхронного электродвигателя, в которой рабочие органы совершают возвратно-поступательное движение.

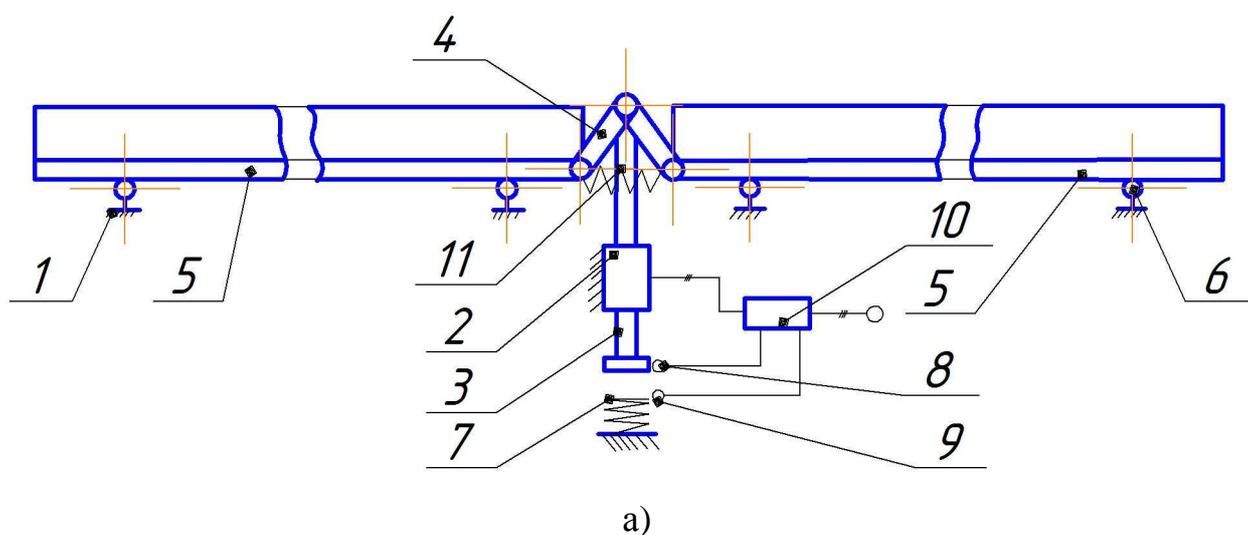
Цель работы заключается в исследовании самоуравновешенной картофелесортировальной установки на базе линейного асинхронного электропривода с высокими технологическими и техническими характеристиками.

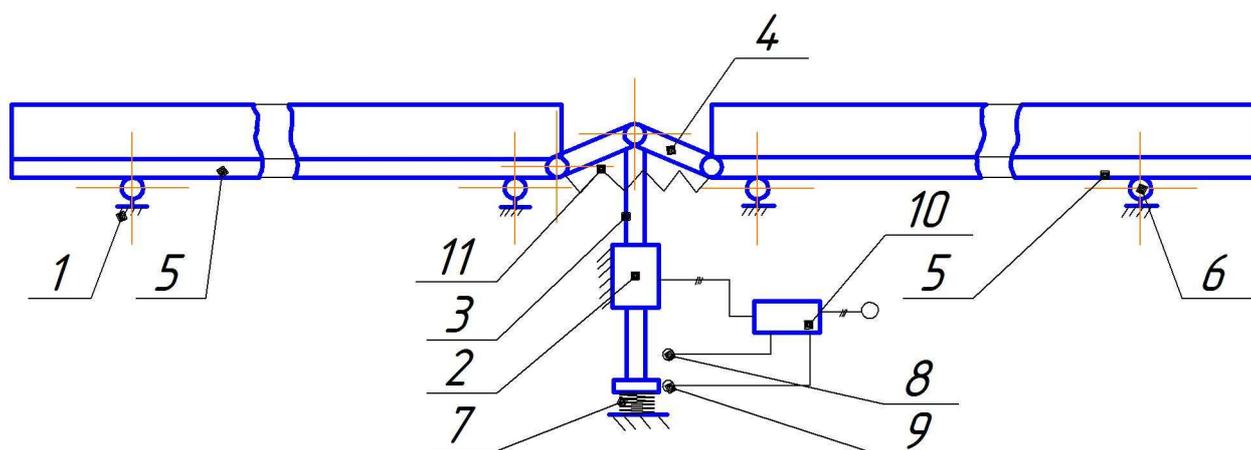
Задачи исследования:

- разработать математическую модель линейного асинхронного электропривода самоуравновешенной картофелесортировальной установки (ЛАЭСКУ) и на ее базе произвести исследование влияния параметров привода на характеристику колебательного процесса рабочего органа и на эффективность работы установки;

- создать экспериментальную ЛАЭСКУ и провести ее физическое исследование.

Предлагаемая установка содержит (рисунок 1): основание 1, цилиндрический линейный асинхронный электродвигатель (ЛАД), состоящий из индуктора 2, установленного жестко на основании 1, и ротора 3, соединенного шарнирно через рычаги 4 с ветвями рабочего органа 5. Продольная ось ЛАД перпендикулярна продольной оси рабочего органа. Ветви рабочего органа установлены на роликах 6 на основании 1. С другой стороны ротор 3 взаимодействует с упругим элементом 7. Включение и отключение ЛАД осуществляется по датчикам 8 и 9 блоком управления 10.





б)

Рисунок 1 Картофелесортировальная установка двухстороннего действия с линейным асинхронным электроприводом (обозначения в тексте)

Картофелесортировальная машина работает следующим образом. Блок управления 10 подключает индуктор 2 ЛАД к источнику питания, индуктор создает бегущее магнитное поле, ротор 3 приходит в поступательное движение, к примеру, вниз (рисунок 1, б). При этом рычаги 4 шарнирно связанные и с ротором, и с ветвями рабочего органа расходятся. Ветви рабочего органа совершают продольное движение в противоположных направлениях. При движении ротора 3 упругий элемент 7 деформируется (сжимается). По достижению выступом на роторе датчика 9 блок управления отключает ЛАД, его бегущее магнитное поле исчезает, картофель по инерции продолжает движение вперед. Под действием потенциальной энергии, накопленной в упругом элементе 7, ветви рабочего органа 5 движутся в обратном направлении, и по достижению ротором датчика положения 8 ЛАД снова подключается к сети. Далее описанный процесс повторяется. При этом рабочий орган 5 совершает колебательное движение, а картофель, подаваемый на рабочий орган, инерционно перемещается по нему. Рабочий орган представляет собой участки из прутков: I-й участок очистки от мелких примесей (поперечные прутки); II-й участок сортировки (мелкая фракция); III-й участок сортировки (средняя фракция); IV-

й участок сортировки (крупная фракция). Сортировка корнеплодов по размеру обеспечивается за счет установки поперечных прутков на необходимом друг от друга расстоянии. Таким образом, картофель, инерционно перемещаясь по ветвям рабочего органа, сначала очищается от мелких примесей на I-м участке, где прутки расположены с небольшим расстоянием между собой перпендикулярно направлению движения картофеля. Далее картофель поступает на II-й участок сортировки мелкой фракции, где прутки расположены параллельно направлению движения картофеля с соответствующим расстоянием между собой. Аналогично устроен III-й участок сортировки средней фракции. Окончательным сходом с рабочего органа будет крупная фракция картофеля (участок IV).

Предложенная установка является самоуравновешенной за счет того, что рабочий орган представляет собой две одинаковые ветви, которые приводятся в действие одним линейным асинхронным электроприводом. Ветви рабочего органа совершают движение в противоположных направлениях. Это позволит свети к минимуму динамические нагрузки на раму и привод установки. Такой способ привода рабочего органа линейным асинхронным электродвигателем позволяет повысить энергетические характеристики установки в целом.

На рисунке 2 представлена кинематическая (расчетная) схема предложенной установки, по которой разработана ее математическая модель.

По рисунку 2 составлены уравнения сил действующих на вторичный элемент, лотки и транспортируемые грузы, по которым построена математическая модель их движения. Для описания математической модели приняты следующие системы координат: XOY - неподвижная относительно основания, $X'_1O'_1Y'_1$ и $X'_2O'_2Y'_2$ - неподвижные относительно лотков 4.

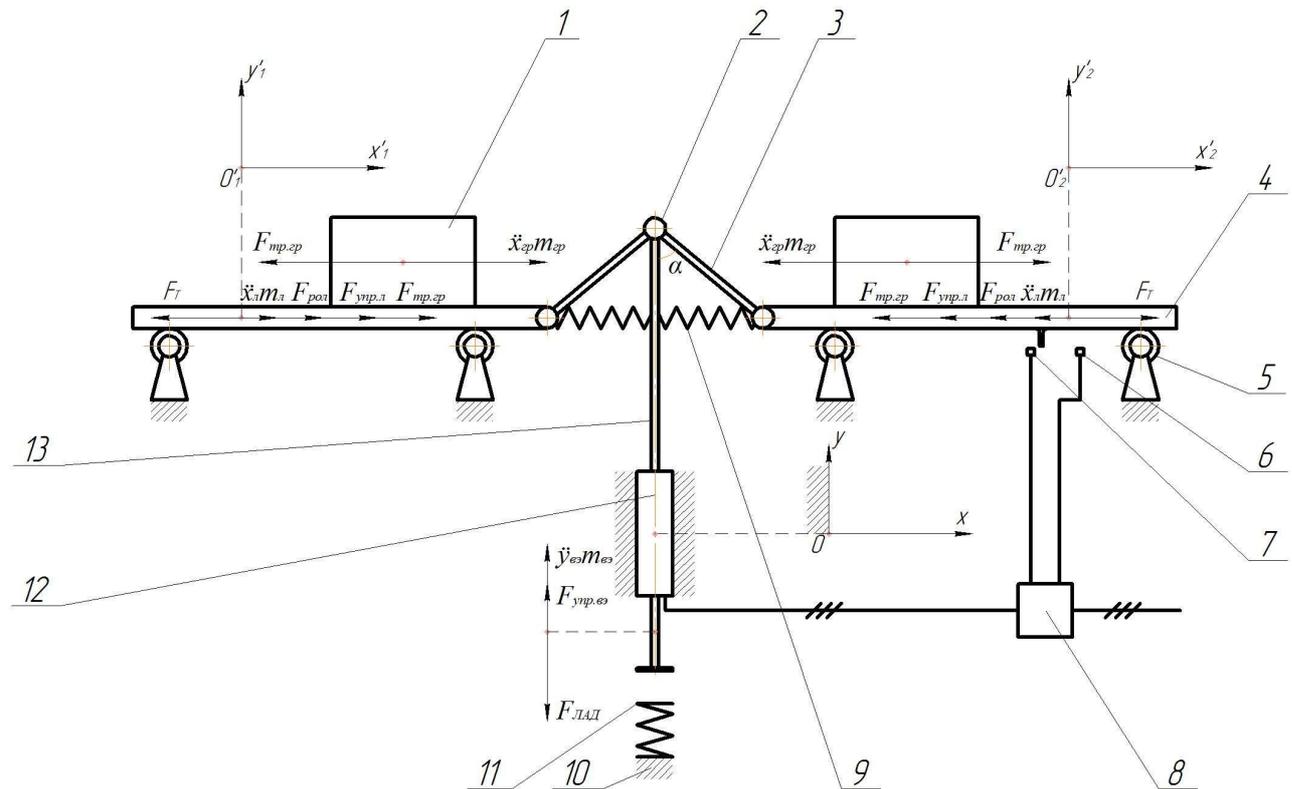


Рисунок 2 Кинематическая схема самоуравновешенной установки с ЛЭП: 1 – инерционный груз; 2 – шарниры; 3 – приводные рычаги; 4 – лотки; 5 – опорные ролики; 6, 7 – датчики положения; 8 – блок управления; 9 – упругий элемент c_1 ; 10 – основание; 11 – упругий элемент c_2 ; 12 – индуктор ЛАД; 13 – вторичный элемент ЛАД

Напряжение питания ЛАД осуществляется по релейному закону в функции координаты вторичного элемента (лотков), поэтому:

$$U_{XI} = \begin{cases} U & \text{при } x_l < S_{\text{выкл}} \text{ и } V_l \geq 0 \\ 0 & \text{при } x_l \geq S_{\text{выкл}} \text{ и } V_l > 0 \\ 0 & \text{при } x_l > S_{\text{вкл}} \text{ и } V_l < 0 \\ U & \text{при } x_l \leq S_{\text{вкл}} \text{ и } V_l < 0, \end{cases}$$

где U – амплитудное напряжение питания ЛАД переменного тока, В;
 $S_{\text{вкл}}$ – координата лотка по оси X , при котором осуществляется включение ЛАД, м; $S_{\text{выкл}}$ – координата лотка по оси X , при котором осуществля-

ется выключение ЛАД, м; x_l – перемещение лотка, м; V_l – скорость лотка м/с.

Запишем уравнения для одной ветви лотка, так как уравнения для обеих ветвей лотков аналогичны. Ускорения транспортирующего лотка и транспортируемого груза соответственно, м/с²:

$$\ddot{x}_l = \frac{1}{m_l + \frac{m_{\text{в.эл.}}}{2} + m_{\text{гр.}}}(F_T - F_{\text{упр.л.}} - F_{\text{рол}} - F_{\text{тр.гр.}} - F_{\text{упр.в.эл.}} \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha})$$

$$\ddot{x}_{\text{гр.}} = \frac{-m_{\text{гр.}}\ddot{x}_l + F'_{\text{тр.гр.}}}{m_{\text{гр.}}},$$

где m_l , $m_{\text{гр.}}$, $m_{\text{в.эл.}}$ – масса транспортирующего лотка, транспортируемого груза и вторичного элемента, соответственно, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; α – угол между вторичным элементом ЛАД и приводным рычагом, °.

Сила трения транспортируемого груза об поверхность лотка, Н:

$$F_{\text{тр.гр.}} = m_{\text{гр.}} \cdot \ddot{x}_{\text{гр.}}$$

Сила упругого элемента c_1 определяется по закону Гука, Н:

$$F_{\text{упр.л.}} = c_1 \cdot x_l$$

где c_1 – коэффициент жесткости упругого элемента, работающего на растяжение, Н/м. Аналогично, в функции перемещения вторичного элемента ЛАД определяется сила упругого элемента c_2 $F_{\text{упр.в.эл.}}$ c_2 – коэффициент жесткости упругого элемента, работающего на сжатие, Н/м.

Сила трения качения опорных роликов, Н:

$$F_{\text{рол}} = \begin{cases} -n_p \delta mg / R_p & \text{при } V_l > 0, \\ 0 & \text{при } V_l = 0, \\ n_p \delta mg / R_p & \text{при } V_l < 0 \end{cases}$$

где n_p – число опорных роликов; δ – коэффициент трения качения роликов (сталь по стали); R_p – радиус опорного ролика, м.

F_{mp}^l - сила сухого трения груза (силы вязкого и адгезионного трения не учитываются в связи с особенностями конвейера) определяется в соответствии с законом Кулона:

$$F_{mp}^l = \begin{cases} m_2 g f_2 & \text{при } V_2^l > 0 \text{ и } m_2 a_{жс} > m_2 g f_{20} \\ m_2 g f_{20} & \text{при } V_2^l = 0 \text{ и } m_2 a_{жс} = m_2 g f_{20} \\ m_2 a_{жс} & \text{при } V_2^l = 0 \text{ и } m_2 a_{жс} < m_2 g f_{20} \\ 0 & \text{при } V_2^l = 0 \text{ и } m_2 a_{жс} = 0 \\ m_2 a_{жс} & \text{при } V_2^l = 0 \text{ и } m_2 a_{жс} < m_2 g f_{20} \\ m_2 g f_{20} & \text{при } V_2^l = 0 \text{ и } m_2 a_{жс} = m_2 g f_{20} \\ m_2 g f_2 & \text{при } V_2^l < 0 \text{ и } m_2 a_{жс} > m_2 g f_{20} \end{cases}$$

где f_2 и f_{20} соответственно коэффициенты трения скольжения и покоя груза.

Сила ЛАД $F_{ЛАД}$ связана с силой тяги F_T следующим образом:

$$F_T = F_{ЛАД} \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha},$$

где $F_{ЛАД}$ – сила, развиваемая линейным асинхронным двигателем, Н.
К.п.д. транспортирования:

$$\eta_{mp} = \frac{P_{mp}}{P_1},$$

где P_1 – потребляемая мощность линейного асинхронного двигателя, кВт;

P_{mp} - средняя механическая мощность, затрачиваемая на транспортирование груза:

$$P_{mp} = m_2 \cdot g \cdot f_2 \cdot V_{cp},$$

где V_{cp} – средняя скорость транспортирования, м/с.

Математическая модель ЛАЭСКУ была реализована в среде объектно-визуального моделирования Matlab [Simulink]. Путем математического моделирования было исследовано влияние параметров линейного электропривода на эффективность работы установки.

Исследование производительности установки от жесткости упругого элемента c_2 , обеспечивающего резкую остановку лотков, а соответственно и инерционное перемещение картофеля показало, что в диапазоне производительности до 30 т/ч жесткость упругого элемента c_2 необходимо выбирать не менее 10000 Н/м, дальнейшее увеличение жесткости не оказывает существенного влияния на производительность.

Угол α между вторичным элементом ЛАД и приводным рычагом необходимо выбирать исходя из максимальной производительности и минимальной силы сопротивления. Согласно полученным зависимостям (рисунок 3) угол α нужно выбирать 60° .

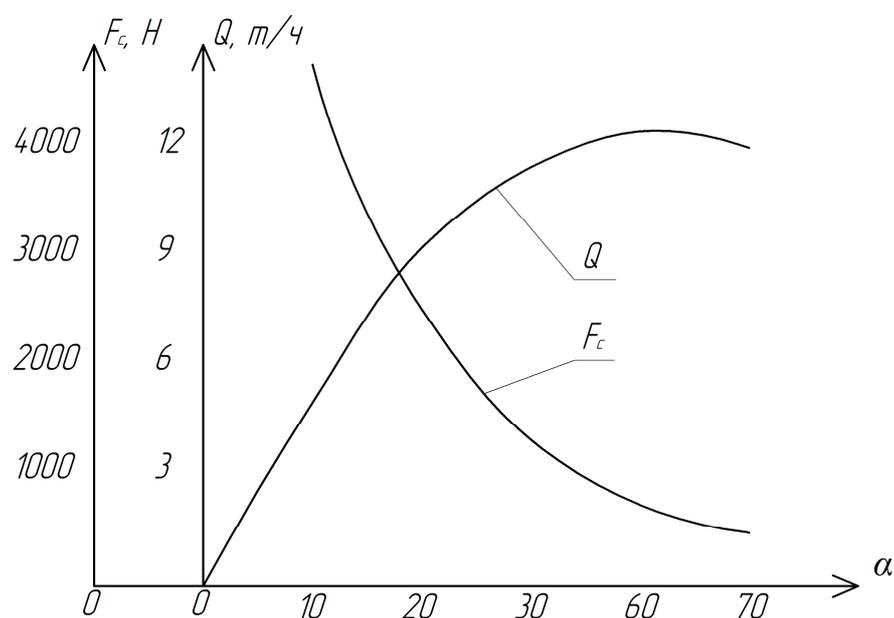


Рисунок 3 Зависимость силы сопротивления F_c на рабочем органе и производительности Q от первоначального угла α между вторичным элементом ЛАД и приводным рычагом

Установлено, что для электродвигателя с мощностью равной 1,5 кВт эффективным значением массы транспортирующих грузов является 20-30 кг, при котором изменение значения жесткости упругого элемента c_1 от 1000 Н/м до 3000 Н/м не оказывает существенного влияния на значение к.п.д. транспортирования груза $\eta_{тр}$, которое может достигать 25% (рисунок 4). Это объясняется тем, что происходит такое сжатие упругого элемента c_2 , при котором приобретенная им в процессе сжатия сила равна, либо больше, чем приобретенная сила упругого элемента c_1 в процессе растяжения. При дальнейшем увеличении массы транспортируемых грузов происходит одновременное повышение силы от упругого элемента c_2 и силы инерции транспортируемых грузов в обратном направлении.

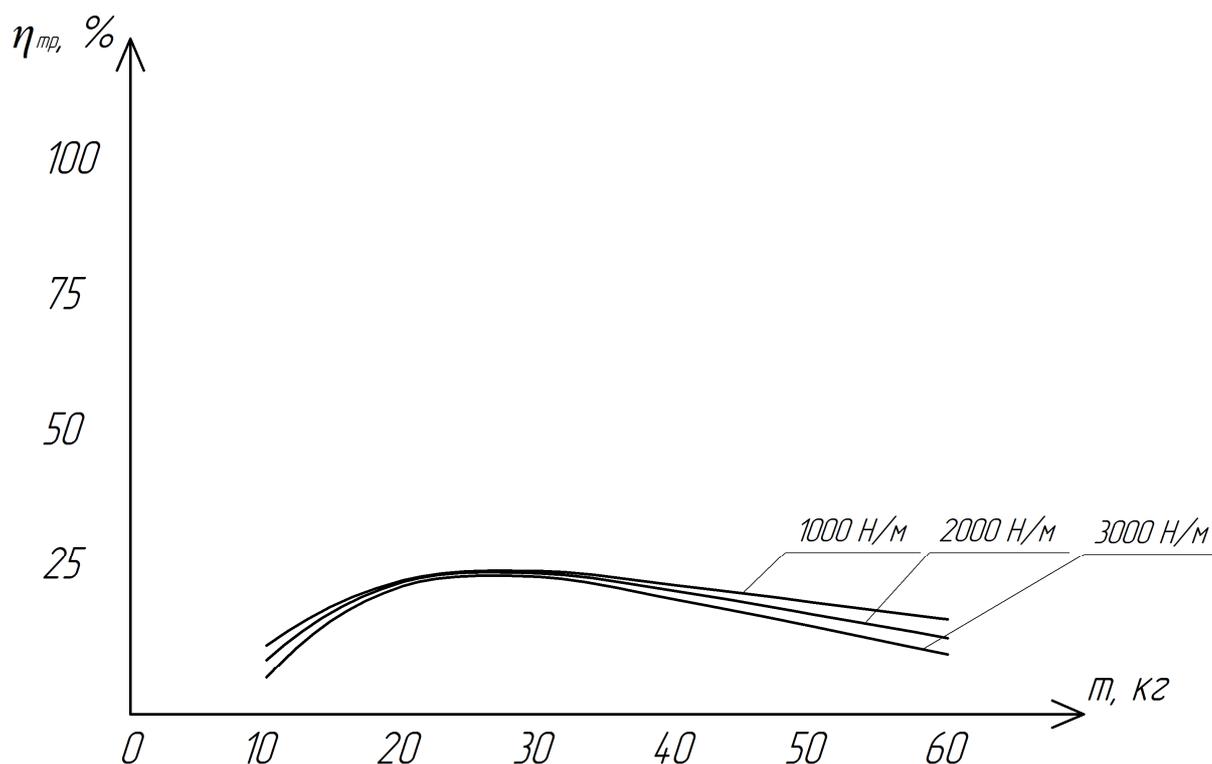


Рисунок 4 Зависимость к.п.д. транспортирования груза $\eta_{тр}$ от массы транспортируемых грузов m при жесткости упругого элемента c_1 1000 Н/м, 2000 Н/м и 3000 Н/м

На кафедре электрических машин и электрооборудования Башкирского ГАУ была реализована описанная установка с линейным асинхронным электроприводом (рисунок 5). Для ее всестороннего исследования была

разработана методика проведения экспериментальных исследований. Согласно методике в качестве электромеханических определяющих параметров электропривода приняты: ток, потребляемый индуктором ЛАД во время работы и амплитуда колебательного движения рабочего органа.

На установку были смонтированы следующие активные датчики: датчик линейных перемещений Gefran LTS09N09KB5C и датчик тока марки CSLA1CF.



Рисунок 5 Экспериментальная самоуравновешенная картофелесортировальная установка с линейным асинхронным электроприводом

Предложена и реализована в среде объектно-визуального моделирования Matlab [Simulink] математическая модель линейного асинхронного электропривода самоуравновешенной картофелесортировальной установки. Математическая модель позволяет в динамике исследовать влияние параметров линейного асинхронного электропривода на параметры колебательного процесса рабочего органа. Определены критерии выбора упругих элементов и кинематических параметров установки.

Установлены оптимальные длины участков очистки и сепарации картофеля исходя из максимальной производительности и скорости транспортирования не более 2 м/с. При скорости транспортирования более 2 м/с возможно повреждение клубней картофеля. Длина участка очистки составила 0,5 м, длины участков сортировки мелкой и средней фракций составили 0,6 м. К.п.д. транспортирования ЛАЭС КУ может достигать 25%, а к.п.д. инерционного транспортирования с классическим приводом только 5%.

Список литературы

1. Гортинский, В.В. О техническом уровне и перспективах развития вибрационных машин для зерноперерабатывающей и пищевой промышленности/ В.В. Гортинский // Машиноведение, 1985. - №1. - С. 3 - 7.
2. Аипов, Р.С. Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин: монография / Р.С. Аипов, А.В. Линенко. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – 308 с.
3. Линенко, А.В. Линейные асинхронные электроприводы сложного колебательного движения для технологических машин АПК: учебное пособие / А.В. Линенко. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. – 184 стр.
4. Линенко, А.В. Безредукторный асинхронный электропривод технологической машины со сложным колебательным движением рабочего органа/ А.В. Линенко, Я.Д. Осипов //Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий. Материалы Всероссийской научно-технической конференции: Т1. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2007. – С. 255 – 259.
5. Пат. на изобр. № 2422348 РФ. Инерционный конвейер / Р. С. Аипов, С. В. Акчурин, А. В. Линенко, М. Ф. Туктаров; заявитель и патентообладатель Башкирский ГАУ. – № 2010110857/11 ; заявл. 22.03.2010 ; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18. – 5 с.
6. Артоболевский, И.И. Методы уравнивания сил инерции в рабочих машинах со сложными кинематическими схемами / И.И. Артоболевский. – М.: Изд-во АН СССР, 1938. – 47с.
7. Гаппоев, Т.Т. Уравнивание инерционных нагрузок двустанных решетных зерноочистительных машин [Текст] / Т.Т. Гаппоев, Ю.Л. Паршин // Уравнивание роторов и механизмов. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 254-262.

References

1. Gortinskij, V.V. O tehničeskom urovne i perspektivah razvitija vibraci-onnyh mashin dlja zernopererabatyvajushhej i pishhevoj promyshlennosti/ V.V. Gortin-skij // Mashinovedenie, 1985. - №1. - S. 3 - 7.
2. Aipov, R.S. Linejnye jelektricheskie mashiny i linejnye asinhronnye jelektroprivody tehnologičeskikh mashin: monografija / R.S. Aipov, A.V. Linenko. – Ufa: Bashkirskij GAU, 2013. – 308 s.
3. Linenko, A.V. Linejnye asinhronnye jelektroprivody slozhnogo koleba-tel'nogo

dvizhenija dlja tehnologicheskikh mashin APK: uchebnoe posobie / A.V. Linenko. – Ufa: Bashkirskij GAU, 2015. – 184 str.

4. Linenko, A.V. Bezreduktornyj asinhronnyj jelektroprivod tehnologicheskoy mashiny so slozhnym kolebatel'nyim dvizheniem rabocheho organa/ A.V. Linenko, Ja.D. Osipov //Jelektrotehnologii, jelektroprivod i jelektrooborudovanie predpriyatij. Ma-terialy Vse-rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii: T1. – Ufa: Izdatel'stvo UGNTU, 2007. – S. 255 – 259.

5. Pat. na izobr. № 2422348 RF. Inercionnyj konvejer / R. S. Aipov, S. V. Akchurin, A. V. Linenko, M. F. Tuktarov; zajavitel' i patentoobladatel' Bashkirskij GAU. – № 2010110857/11 ; zajavl. 22.03.2010 ; opubl. 27.06.2011, Bjul. № 18. – 5 s.

6. Artobolevskij, I.I. Metody uravnoveshivaniya sil inercii v rabochih ma-shinah so slozhnymi kinematcheskimi shemami / I.I. Artobolevskij. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1938. – 47s.

7. Gappoev, T.T. Uravnoveshivanie inercionnyh nagruzok dvustannyh reshetnyh zernoochistitel'nyh mashin [Tekst] / T.T. Gappoev, Ju.L. Parshin // Uravnoveshivanie rotorov i mehanizmov. – M.: Mashinostroenie, 1978. – S. 254-262.