

УДК 621.313: 621.926

ПЛОСКИЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЖЕРНОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Аипов Р.С., Галиуллин Р.Р., Нугуманов Р.Р., Зиганшин Б.Г.

Реферат. В современном производстве муки актуальным является сохранение в ней всех витаминов и минеральных веществ. Минеральные вещества и витамины сохраняются в муке, помолотой из цельных зерен. В жерновых мельницах (ЖМ) зерно подвергается многократному воздействию рабочих поверхностей жерновов, вследствие чего мука содержит большой процент важнейших составляющих зерна. Привод ЖМ должен обеспечить низкую частоту вращения жерновов (окружная скорость до 10 м/с) и возможность плавного регулирования его скорости и момента вращения без снижения производительности мельницы. С рассматриваемой точки зрения перспективным является применение в приводе ЖМ вместо асинхронных двигателей вращения с дополнительными устройствами (редукторов, ременных, клиноременных передач и т.п.) плоских асинхронных электроприводов (ПЭП). В статье предложены возможные варианты технических решений ЖМ с ПЭП. Получен вывод о том, что использование в приводе ЖМ плоского асинхронного двигателя (ПАД) позволяет не только плавно регулировать частоту и момент вращения жерновов, но и из-за присутствия краевых эффектов предотвратить залипание муки в рабочей зоне жерновов. Составлена с возможностью решения аналитическими методами математическая модель привода ЖМ на базе ПАД с учетом продольного краевого эффекта, силы вязкого (внутреннего) и сухого (внешнего) трения. Найдены механические характеристики привода при перемещении индукторов ПАД и получены зависимости изменения производительности мельницы от частоты вращения жернова при измельчении разного рода зерна, изменении коэффициента заполнения зоны измельчения и зазора между жерновами.

Ключевые слова: плоский электропривод, жерновая мельница, частота и моменты вращения, регулирование, плоский асинхронный двигатель.

Введение. Для ЖМ характерна низкая частота вращения жерновов (окружная линейная скорость до 10 м/с), а также своя рациональная частота, которая требуется для помола определенного рода зерна [1]. Известно, что при помолу ржи производительность ЖМ может уменьшаться на 15 – 20%, по отношению к помолу пшеницы при одной и той же частоте вращения [2]. Используемые в приводе ЖМ электрические двигатели вращения не позволяют получить требуемую низкую частоту вращения без использования дополнительных передаточных устройств (редукторов, ременных, клиноременных передач и т.п.). Попытки плавного регулирования частоты вращения мельницы применением преобразователей частоты питания, значительно ухудшают эксплуатационные, энергетические и массогабаритные характеристики электропривода. Современный привод ЖМ должен обеспечивать не только получение низкой частоты вращения рабочего органа, но и возможность плавного регулирования его частоты и момента вращения без снижения производительности мельницы.

С этой точки зрения перспективным является применение в приводе ЖМ ПАД [3,4,5], обеспечивающего получение регулируемой частоты и момента вращения жерновов без усложнения конструкции самой мельницы, что представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Условия, материалы и методы исследо-

ваний. Анализ известных работ дает возможность предложить следующие варианты технического решения ЖМ с ПЭП (рисунок 1).

Применение ПАД в приводе ЖМ позволяет реализовать регулирование частоты и момента вращения двух жерновов, вращающихся в противоположные стороны (рисунок 1, в) [6].

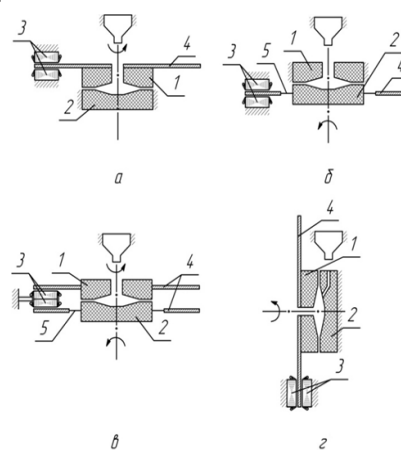


Рисунок 1 – Варианты технических решений ЖМ с ПЭП: а, б, в мельницы с вертикальной осью вращения жерновов; г мельница с горизонтальной осью вращения жерновов: 1 – верхний жернов, 2 – нижний жернов, 3 – индукторы ПАД, 4 – вторичный элемент ПАД, 5 – зона выхода муки

Разработана математическая модель ЖМ с ПЭП [7]. На рисунке 2 представлена обобщенная схема ЖМ с ПЭП.

Уравнение, описывающее движение рабочего органа (жернова) может быть представлено в виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = F \cdot R + F_{ПКЭ} \cdot R - F_{в.мп} \cdot R \cdot k_{np} - F_{с.мп} \cdot R \cdot k_{np}. \quad (1)$$

где J – момент инерции вторичного элемента ПАД, $кг \cdot м^2 / с^2$; $F_{в.мп} = \beta \cdot \dot{x}$ – сила вязкого (внутреннего) трения, H ; β – коэффициент вязкого (внутреннего) трения, $H \cdot с / м$; $\dot{x}(t)$ – производная пути перемещения подвижного жернова по времени; $F_{с.мп}$ – сила сухого (внешнего) трения, H ; R – расположение индукторов ПАД от оси жернова, $м$; k_{np} – приведенный коэффициент.

Мельница работает в установившемся режиме, длина ПАД значительно меньше длины окружности вторичного элемента, поэтому для определения силы, развиваемой ПАД, может быть использовано полное уравнение Клосса, составленное по Т – образной схеме замещения асинхронного двигателя [8,9]:

$$F = \frac{F_k (2 + g) s_k (v_1 - \dot{x}) v_1}{s_k^2 v_1^2 + (v_1 - \dot{x})^2 + s_k (v_1 - \dot{x}) g v_1}. \quad (2)$$

где $F_k = 3 \cdot I_1^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot R_2' / 2 \cdot \tau \cdot f_1$ – критическая сила ПАД, H ; I_1 – сила тока в индукторе, A ; ε_0 – добротность двигателя; R_2' – приведенное активное сопротивление вторичного элемента, $Ом$; τ – полюсное деление ПАД, $м$; f_1 – частота питающей сети, $Гц$; $s_k = 1/\varepsilon_0$ – критическое скольжение ПАД; v_1 – синхронная скорость ПАД, $м/с$;

$$g = \frac{2 R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2 + X_1 X_2 / X_m)^2}} -$$

параметр двигателя, определяемый по схеме замещения ПАД; R_1 и X_1 – активное и реактивное сопротивления фазы индуктора; X_2 – приведенное реактивное сопротивление вторичного элемента; X_m – сопротивление взаимной индукции между индуктором и вторичным элементом.

Особенность ПАД по сравнению с обычными асинхронными двигателями вращения заключается в том, что при его работе возникает продольный краевой эффект (ПКЭ).

Схема замещения ПАД, которая учитывает наличие ПКЭ в ПАД по одномерной модели А.И. Вольдека [10], отличается от обычной Т – образной схемы замещения асинхронного двигателя вращения наличием $Z_{кэ}$ сопротивления в первичной обмотке.

Сопротивление $Z_{кэ}$ определяется по следующему выражению:

$$Z_{кэ} = \frac{-(R_1 + jX_1)}{2p\pi} \left[\frac{\lambda - \eta - j}{2\lambda(\lambda + \eta + j)} (1 - e^{-(\lambda + \eta)2p\pi}) + \frac{\lambda + \eta + j}{2\lambda(\lambda - \eta - j)} (1 - e^{-(\lambda - \eta)2p\pi}) \right]. \quad (3)$$

где $\lambda = \sqrt{\eta^2 + j\varepsilon_0}$ – комплексное слагаемое; $\eta = \varepsilon_0 / 2(1 - s)$ – вещественное число; p – число

пар полюсов ПАД; s – скольжение.

Амплитудное значение $F_{ПКЭ}$, обусловленное отраженной волной бегущего магнитного поля имеет вид:

$$F_{ПКЭ} = \frac{3 R_{кэ} I_1^2}{2 \tau f_1}, \quad (4)$$

где $R_{кэ}$ – активная составляющая сопротивления $Z_{кэ}$, $Ом$.

Сила вязкого (внутреннего) трения $F_{в.мп}$ определяется движением потока зерна в рабочей зоне жерновов, которое может быть моделировано, согласно инженерной реологии, течением жидкости при переходе от слоя к слою [12]:

$$F_{в.мп} = \beta \cdot \dot{x} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{h_0 \cdot \rho + 4 \sigma \cdot f_g \cdot g_3 \cdot R_{жс}}{4 \cdot \dot{\gamma}}$$

где β – коэффициент вязкого трения, $H \cdot с / м$; h_0 – предельное значение высоты вертикально стоящего столба сыпучего материала, определяемое экспериментально, $м$; ρ – плотность зерна, $кг/м^3$; σ – напряжение сжатия, $кг/м^2$; f_g – коэффициент внутреннего трения зерна; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, $с^{-1}$; g_3 – ускорение свободного падения зерна, $м/с^2$; $R_{жс}$ – радиус жерновов, $м$;

Сила сухого (внешнего) трения определяется законом Ш. Кулона и описывается следующим выражением:

$$F_{с.мп} = f_c \cdot N, \quad (6)$$

где $f_c = tg\varphi$ – коэффициент трения зерна и камня; φ – угол трения; $N = m \cdot g_3$ – сила нормального давления, H ; $m = m_{жс} + m_3$ – масса подвижного жернова и зерна, находящегося в рабочей зоне, $кг$.

Силу, развиваемую ПАД по (2) при значениях $s_k \approx 0,2 - 0,4$, можно упростить и представить в виде:

$$F = F_k (B_0 + B_1 \dot{x} + B_2 \dot{x}^2), \quad (7)$$

где B_0, B_1, B_2 – постоянные коэффициенты, которые определяются:

$$B_0 = \frac{0,5s_k(2+g)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2} + \frac{0,5s_k(2+g)(s_k^2-0,25)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2} + \frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k)^2}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^3} - \frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k) + 0,25s_k(2+g)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2};$$

$$B_1 = -2 \left[\frac{0,5s_k(2+g)(s_k^2-0,25)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2} + 2 \frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k)^2}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^3} \right] / v_1;$$

$$B_2 = 4 \left[\frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k)^2}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^3} - \frac{s_k(2+g)(0,5+0,5gs_k) + 0,25s_k(2+g)}{(0,25+s_k^2+0,5gs_k)^2} \right] / v_1^2.$$

После подстановки (7) в (1) дифференциальное уравнение движения жернова без учета $F_{ПКЭ}$ (при $p > 4$) имеет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = F_k \cdot (B_0 + B_1 \cdot \dot{x} + B_2 \cdot \dot{x}^2) \cdot R - (\beta \cdot \dot{x}) \cdot R \cdot k_{np} - F_{с.мп} \cdot R \cdot k_{np}. \quad (8)$$

Уравнение (8) представляет собой дифференциальное уравнение движения жернова без учета $F_{ПКЭ}$ (при $p > 4$) имеет вид

движного жернова в квадратурах. Решение для установившейся частоты вращения n [об/мин] имеет вид:

$$n = 60 \cdot \left[Y - \frac{d}{2f} \right] / 2\pi R, \quad (9)$$

где $Y = \sqrt{\frac{(\beta - F_k B_1)^2}{4(F_k B_2)^2} - \frac{F_k B_0 - F_{c,mp}}{F_k B_2}}; \frac{d}{2f} = -\frac{\beta - F_k B_1}{2 F_k B_2}$

– безразмерные параметры, характеризующие работу ПАД в приводе ЖМ;

Зная частоту вращения жернова мельницы, можно найти ее производительность [11] по выражению:

$$Q = 60 \cdot k_1^2 k_2 \psi \rho D_D^2 \delta_{жс} n, \quad (10)$$

где k_1 — коэффициент производительности (обычно $k_1 = 0,7$); k_2 — коэффициент частоты вращения ($k_2 = 0,01$); ψ — коэффициент заполнения зоны измельчения зерном между жерновами ($\psi = 0,7 \div 0,8$); ρ — плотность измельчаемого зерна, $кг/м^3$; D_D — наружный диаметр жернова, м; $\delta_{жс}$ — зазор между жерновами, м.

Анализ и обсуждение результатов. С учетом ПКЭ в ПАД (ФПКЭ $\neq 0$, при $p \leq 4$), математическая модель движения привода решается только методами численного интегрирования (Matlab) [12, 13]. Механические характеристики двигателя и ЖМ, график зависимости частоты вращения жернова от перемещения индукторов ПАД изображены на рисунках 3, 4.

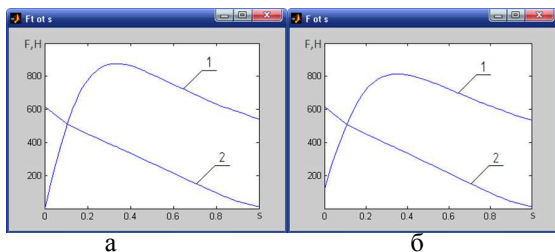


Рисунок 3 – Механические характеристики двигателя (1) и ЖМ (2): $R_1=0.87(Ом), R_2=0.64(Ом), X_1=0.35(Ом), X_2=1.5(Ом), X_m=1.92(Ом), U=380 В, w=314рад/с, p=2; t=0,042м, v_1=4,2м/с; \beta = 49,5 Н·с/м; F_{c,mp}=19,75 Н;$
а – без учета влияния ПКЭ;

При решении уравнения движения математической модели с учетом ПКЭ выявлено, что сила ПАД уменьшается на 4,9 -7,6 %. Из этого следует, что при инженерных расчетах частоты вращения подвижного жернова можно найти по выражению (9).

На рисунке 4 приведен график зависимости частоты вращения жернова при перемещении индукторов ПАД от оси мельницы.

Установлено, что наибольшее влияние на процесс измельчения оказывает вязкое (внутреннее) трение, которое в свою очередь зависит от рода зерна. Наибольшую силу сопротивления оказывает озимая рожь, коэффи-

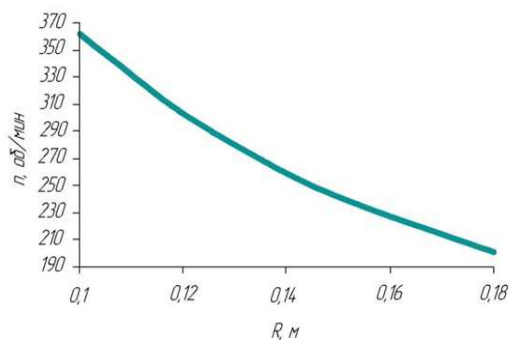


Рисунок 4 – Частота вращения жернова n (об/мин) при перемещении

циент вязкости которой лежит в пределах от $93,0 \div 93,4 Н·с/м$, а наименьшее сопротивление озимая пшеница - $39,8 \div 40,4 Н·с/м$. Выявлено, что при малых диаметрах жерновов, сила сухого (внешнего) трения не оказывает столь большого влияния на работу, и при диаметрах жерновов $\leq 0,2 м$, ею можно пренебречь (рисунок 5).

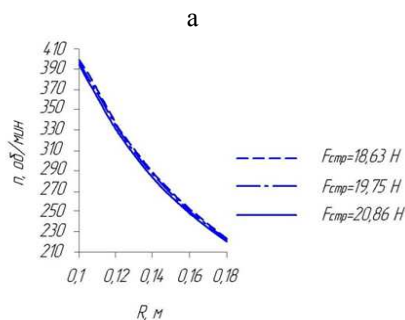
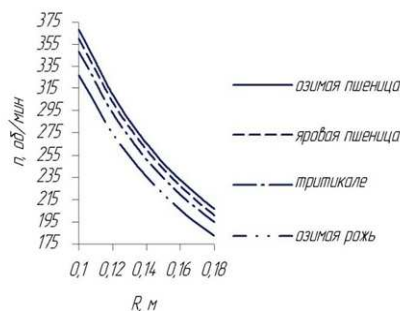
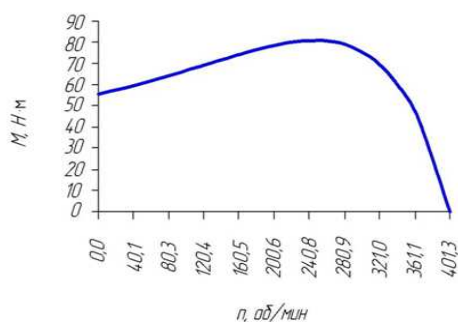
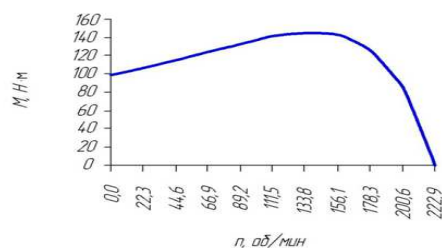


Рисунок 5 – Влияние на частоту вращения жернова при перемещении индукторов:
а – коэффициента вязкого трения – $\beta, Н·с/м$;
б – силы сухого трения – $F_{c,тр}, Н$

Применение двухстороннего плоского ПАД позволяет регулировать не только частоту вращения жерновой мельницы, но и момент на вторичном элементе двигателя (рисунок 6), причем видно, что при расположении индукторов на расстоянии 0,1 м (максимальное приближение) от оси мельницы возможно получить момент вращения 81,53 Н·м и 0,18 м (максимальное отдаление) от оси мельницы – 146,75 Н·м.



а



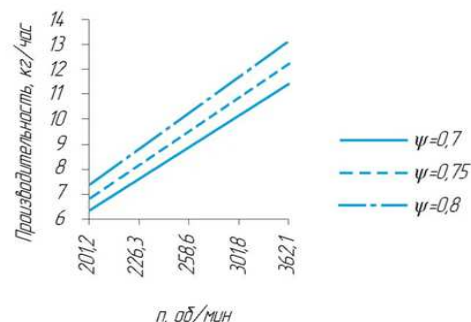
б

Рисунок 6 – Механическая характеристика двигателя при расположении индукторов ПАД:
а – 0,1 м от оси мельницы;
б – 0,18 м от оси мельницы.

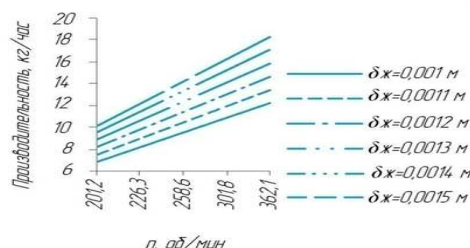
Получены зависимости изменения производительности от частоты вращения жернова при изменении коэффициента заполнения зоны измельчения ψ от 0,7 до 0,8; зазора между жерновами от 0,001 до 0,0015 м (рисунок 7).

Максимальное увеличение производительности ЖМ с ПЭП наблюдается при изменении зазора между жерновами от 0,001...0,0015 м (1...1,5 мм). Однако, с увеличением зазора увеличивается количество крупных частиц (составляющих зерна) в муке, поэтому целесообразным является увеличение зазора в пределах от 0,001...0,0012 м (1...1,2 мм).

Выводы. Сделан вывод о целесообразности применения ЖМ в производстве муки, богатой минеральными веществами и витаминами. Разработаны варианты компоновки ЖМ с ПЭП, упрощающие конструкцию электропривода. Новизна технических решений защищена патентами РФ на изобретение № 2482920, 2546860.



а



б

Рисунок 7 – Влияние на производительность мельницы: а – коэффициента заполнения зоны измельчения (ψ); б – зазора между жерновами ($\delta_{ж}$)

Обоснована конструктивно-технологическая схема электропривода и разработана его математическая модель. С учетом особенностей измельчаемого материала и условий работы мельницы (сила вязкого и сухого трения) модель решается аналитическими методами. При учете конструктивных особенностей ПАД (сила ПКЭ) математическая модель имеет решение в среде объектно-визуального моделирования Matlab (приложение Simulink).

Выявлено, что наибольшую силу сопротивления на процесс измельчения оказывает сила вязкого трения. Наибольшим коэффициентом трения обладает озимая рожь ($93,0 \div 93,4$ Н·с/м), а наименьшим - озимая пшеница ($39,8 \div 40,4$ Н·с/м). Разница между частотой вращения жернова при помоле этих зерен составляет 10,9 – 11,2%. Сила сухого трения при малом диаметре жерновов (0,2 м) находится от 18,63 Н до 20,86 Н и не оказывает большого влияния на частоту вращения.

Литература

1. Егоров Г.А. Технологические свойства зерна: учебник / Г.А. Егоров – М.: Агропромиздат, 1985.–334 с.
2. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна: учебное пособие / А.Я. Соколов. – М.:Колос,1967. – 448 с.
3. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей: учебное пособие / С. Ямамура. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.– 180с.
4. Laithwaite E.R. Induction Machines for Special Purposes, New York: Chemical Publishing Co. Ltd, 1986, 377pp.
5. Насар С.А. Линейные тяговые электрические машины: учебное пособие /С.А. Насар, И. Болдеа. – М.: Транспорт, 1981. – 176с.

6. Патент № 2546860 Российская Федерация, МПК В02С7/08, В02С7/16. Устройство для измельчения / Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р., Линенко А.В.; заявитель и патентообладатель: Р.С. Аипов (RU), Р.Р. Нугуманов (RU), А.В. Линенко (RU) - №2013153279/13; заявлен 29.11.2013; опубликован 10.04.2015, Бюл. № 10. – 7 с.

7. Аипов Р.С. Математическая модель жерновой мельницы с двухсторонним линейным асинхронным двигателем в приводе/ Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов//Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. - №4. – С.27 – 31.

8. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели: учебное пособие / О.Н.Веселовский, А.Ю.Коняев, Ф.Н.Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256с.

9. Сарапулов Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учебное пособие / Ф.Н.Сарапулов, С.Ф.Сарапулов, П.Н. Шымчак. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2001. – 236с.

10. Вольдек А.И. Основы теории и методики расчета характеристик линейных асинхронных машин/ А.И. Вольдек, Е.В. Толвинская//Электричество. – 1975. – №9. – С.29 – 36.

11. Вельтищев В.Н. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств. Часть 2. «Машины для выполнения процессов измельчения, прессования и перемешивания»: учебно-практическое пособие/ В.Н. Вельтищев, Ю.А. Калошин - М.: МГУТУ, 2005.

12. Гултыяев А.Б. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс / А.Б. Гултыяев–СПб. Питер, 2000. – 432с.

13. Конаев А.Ю. Linear induction machines for electrodynamic separation of non-ferrous metals / A.Yu. Konyaev, E.Yu. Obvintseva – Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus, 2017. - Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. - 1567-1570 p.

Сведения об авторах:

Аипов Рустам Сагитович – доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин и электрооборудования, E-mail: aipovrs@mail.ru.

Галиуллин Рустам Рифович – доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения и применения электрической энергии, E-mail: rustam6274@mail.ru.

Нугуманов Раушан Римович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических машин и электрооборудования, E-mail:nugraush@rambler.ru.

ФГБОУ ВО Башкирский государственный аграрный университет, г.Уфа, Россия.

Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор, профессор РАН, e-mail: zigap66@mail

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань, Россия.

FLAT ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF STONE MILL

Aipov R.S., Galiullin R.R., Nugumanov R.R., Ziganshin B.G.

Abstract. In modern flour production, the preservation of all vitamins and minerals in it is relevant. Minerals and vitamins are stored in flour, ground from whole grains. In the stone mills, the grain is subjected to repeated exposure to the working surfaces of the millstones, as a result of which the flour contains a large percentage of the most important components of the grain. The stone mill's drive should provide a low rotational speed of the mills (peripheral speed up to 10 m/sec.) and the possibility of smooth control of its speed and torque without reducing the performance of the mill. From this point of view, it is promising to use in the mill's drive, instead of asynchronous motors, rotation with additional devices (gearboxes, belt drives, V-belt drives, etc.) of flat asynchronous electric drives. The article suggests possible variants of technical solutions for stone mills with flat electric drives. It was concluded that the use of a flat asynchronous motor in the mill's drive allows not only smoothly adjusting the frequency and torque of the millstones, but also because of the presence of edge effects, to prevent flour sticking in the millstone working zone. Compiled with the possibility of solving by analytical methods a mathematical model of mill's drive, based on a flat electric drives, taking into account the longitudinal edge effect, the strength of viscous (internal) and dry (external) friction. The mechanical characteristics of the drive were found when moving the flat electric drives inductors and the dependencies of the change in the mill productivity on the millstone rotation frequency when grinding various grains, changing the fill factor of the grinding zone and the gap between the millstones were obtained.

Key words: flat electric drive, stone mill, frequency and torques, regulation, flat asynchronous motor.

References

1. Egorov G.A. *Tekhnologicheskie svoystva zerna: uchebnik*. [Technological properties of grain: the textbook]. / G.A. Egorov – М.: Agropromizdat, 1985. – P. 334.

2. Sokolov A.Ya. *Tekhnologicheskoe oborudovanie predpriyatiy po khraneniyu i pererabotke zerna: uchebnoe posobie*. [Technological equipment for grain storage and processing enterprises: a tutorial]. / A.Ya. Sokolov. – М.: Kolos, 1967. – P. 448.

3. Yamamura S. *Teoriya lineynykh asinkhronnykh dvigateley: uchebnoe posobie*. [Theory of linear asynchronous motors: a tutorial]. / S. Yamamura. – L.: Energoatomizdat, 1983. – P. 180.

4. Laithwaite E.R. *Induction Machines for Special Purposes*, New York: Chemical Publishing Co. Ltd, 1986, P. 377.

5. Nasar S.A. *Lineynye tyagovye elektricheskie mashiny: uchebnoe posobie*. [Linear traction electric machines: a tutorial]. / S.A. Nasar, I. Boldea. – М.: Transport, 1981. – P. 176.
6. Patent №2546860 Rossiyskaya Federatsiya, MPK V02S7/08, V02S7/16. *Ustroystvo dlya izmelcheniya*. [A device for grinding]. / Aipov R.S., Nugumanov R.R., Linenko A.V.; zayavitel i patentoobladatel: R.S. Aipov (RU), R.R. Nugumanov (RU), A.V. Linenko (RU) - №2013153279/13; applied 29.11.2013; published 10.04.2015, Bul. № 10. –P. 7.
7. Aipov R.S. Mathematical model of a millstone with a double-sided linear asynchronous motor in a drive. [Matematicheskaya model zernovoy melnitsy s dvukhstoronnim lineynym asinkhronnym dvigatelem v privode]. / R.S. Aipov, R.R. Nugumanov // *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekxy i sistemy. - Electrical and information complexes and systems*. – 2013. - №4. – P. 27 – 31.
8. Veselovskiy O.N. *Lineynye asinkhronnye dvigateli: uchebnoe posobie*. [Linear asynchronous motors: study guide]. / O.N. Veselovskiy, A.Yu. Konyayev, F.N. Sarapulov. – М.: Energoatomizdat, 1991, – P. 256.
9. Sarapulov F.N. *Matematicheskie modeli lineynykh induktsionnykh mashin na osnove skhem zamesheniya: uchebnoe posobie*. [Mathematical models of linear induction machines based on replacement schemes: a tutorial]. / F.N. Sarapulov, S.F. Sarapulov, P.N. Shymchak – Ekaterinburg: Izd-vo UGTU–UPI, 2001. – P. 236.
10. Voldek A.I. Fundamentals of the theory and methodology for calculating the characteristics of linear asynchronous machines. [Osnovy teorii i metodiki rascheta kharakteristik lineynykh asinkhronnykh mashin]. / A.I. Voldek, E.V. Tolvinskaya // *Elektrichestvo. – Electricity*. – 1975. - №9. – P. 29 – 36.
11. Veltishev V.N. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya mashin i apparatov pischevykh proizvodstv. Chast 2. "Mashiny dlya vypolneniya protsessov izmelcheniya, pressovaniya i peremeshivaniya": uchebno-prakticheskoe posobie*. [Fundamentals of calculation and design of machines and devices for food production. Part 2. "Machines for performing the processes of grinding, pressing and mixing": a training manual]. / V.N. Veltishev, Yu.A. Kaloshin - М., MGUTU, 2005.
12. Gulyaev A.B. *Vizualnoe modelirovanie v srede MATLAB: uchebnyy kurs*. [Visual modeling in the MATLAB environment: a training course]. / A.B. Gulyaev – SPb: Piter, 2000. – P. 432.
13. Konyayev A.Yu. Linear induction machines for electrodynamic separation of non-ferrous metals / A.Yu. Konyayev, E.Yu. Obvintseva – Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus, 2017. - Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. - 1567-1570 p.

Authors:

Aipov Rustam Sagitovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Electrical machines and equipment Department, E-mail: aipovrs@mail.ru.
 Galiullin Rustam Rifovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Power supply and application of electric energy Department, E-mail: rustam6274@mail.ru.
 Nugumanov Raushan Rimovich – Ph.D. of Technical Sciences, Senior Lecturer of Electrical machines and equipment Department, E-mail: nugraush@rambler.ru.
 Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.
 Ziganshin Bulat Gusmanovich – Doctor of Technical sciences, Professor, professor of the Russian Academy of Sciences, e-mail: zigan66@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.