

Научная статья

УДК 621.313:621.926

## **Мельница для помола цельнозерновой муки с плоским двухсторонним двигателем в приводе**

**Рустам Сагитович Аипов, Раушан Римович Нугуманов**  
Башкирский ГАУ

*Аннотация.* Технологические машины для получения муки занимают важное место в производстве продуктов питания, поэтому актуально сохранение в муке максимума минеральных веществ и витаминов. В цельнозерновой муке содержатся все минеральные вещества и витамины. Для помола цельного зерна применяются вальцовые и жерновые мельницы. В промышленных масштабах жерновые мельницы уступают вальцовым из-за их производительности. Однако по количеству минеральных веществ и витаминов в муке жерновые мельницы превосходят вальцовые. Производством жерновых мельниц активно занимаются в Германии и Австрии. В электроприводе зарубежных жерновых мельниц используются высокоскоростные коллекторные и асинхронные двигатели вращения. Так как скорость вращения жерновов для удовлетворения допустимой температуры нагрева должна быть низкой (окружная скорость до 10 м/с), производители в электроприводах используют дополнительные преобразующие и передаточные устройства, что усложняет электропривод и ограничивает его возможности. Применение преобразователей частоты источника питания снижает КПД, ухудшает массогабаритные показатели технологической машины. В статье проанализирована математическая модель жерновой мельницы с плоским двухсторонним асинхронным двигателем в приводе (ПДАД), индукторы (статор) которого охватывают вращающийся вторичный элемент (ротор) с двух сторон. При этом регулирование производительности и дополнительно высвобождение рабочей зоны жерновов от накопившейся муки достигается изменением положения и конструктивными особенностями исполнения индукторов ПДАД. Жерновые мельницы с ПДАД имеют широкие возможности конструктивных решений, например с двумя одновременно вращающимися в разные стороны жерновами.

*Ключевые слова:* жерновая мельница, плоский асинхронный двигатель, электропривод.

**Для цитирования:** Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р. Мельница для помола цельнозерновой муки с плоским двухсторонним двигателем в приводе // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (87). С. 171–177.

Original article

## The mill for production wholemeal flour with flat double-sided motor in drive

Rustam S. Aipov, Raushan R. Nugumanov  
Bashkir State Agrarian University

**Abstract.** Technological machines for the production of flour occupy an forefront in food production, so it is important to preserve the maximum of minerals and vitamins in flour. Whole-grain flour contains all the minerals and vitamins. Roller and millstone mills are used for grinding whole grains. In production scope millstone mills are inferior to roller mills because of their productivity. However, in terms of the amount of minerals and vitamins in flour, millstone mills is superior to roller. Therefore, the production of MM is actively involved in Germany, Austria. The electric drive of the listed millstone mills uses high-speed collector and asynchronous rotation motors. Since the speed of rotation of the millstones to meet the permissible heating temperature must be low (circumferential speed up to 10 m/s), manufacturers use additional conversion and transfer devices in electric drives, which complicates the electric drive and limits its capabilities. The use of frequency converters of the power supply reduces the efficiency, worsens the weight and size parameters of the technological machine. The article investigates a mathematical model of a flat double-sided induction motor (FDSIM) in the drive, inductors (stator) which cover the rotating secondary element (rotor) on both sides. In this case, the regulation of productivity and additionally the release of the working area of the millstones from accumulated flour is achieved by changing the position and design features of the flat double-sided induction motor. Millstone mills with flat double-sided induction motor have a wide range of design solutions, for example, with two simultaneously rotating millstones in different directions.

**Keywords:** millstone mill, flat induction motor, electric drive.

**For citation:** Aipov R.S., Nugumanov R.R. The mill for production wholemeal flour with flat double-sided motor in drive. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021; 87(1): 171–177. (In Russ.).

На сегодняшний день мало производителей, которые могут предложить цельнозерновую муку, да ещё и помола с использованием жерновой мельницы (ЖМ) [1]. Жерновой помол с использованием технологии перетирания зерна с помощью натурального камня (корунда) практически не используется в массовом производстве. В цельнозерновой муке ЖМ содержится наибольший процент важнейших витаминов В1, В2, РР и Е [2].

Максимальная скорость вращения жерновов определяется допустимой температурой нагрева в технологическом процессе помола муки, вследствие чего имеет место низкая угловая скорость (линейная скорость до 10 м/с) вращения жерновов [3]. Для ЖМ является принципиальным не только необходимость получения низкой скорости вращения жёрнова, но и остаётся нерешённым вопрос плавного регулирования скорости вращения. Как известно, при помоле ржи производительность жерновых мельниц может уменьшаться на 15 %, при помоле ячменя и овса – на 30 % и кукурузы – на 40 % по отношению к помолу пшеницы при одной и той же скорости вращения [3, 4].

Перспективным является применение в электроприводе ЖМ простых в изготовлении и надёжных в эксплуатации ПДАД [5–7].

Авторами предлагается безредукторный электропривод ЖМ на базе ПДАД с ротором, выполненным в виде диска с жёстко закреплённым на нём жёрновом. Особенностью ПДАД, в отличие от асинхронных двигателей вращения, является наличие концевых эффектов (КЭ) [8].

В низкоскоростных ПДАД (у которых число пар полюсов меньше или равно 4) КЭ проявляется в виде вибрации ротора с частотой, равной двойной частоте источника питания [9]. Ротор ПДАД может совершать регулируемое в широком диапазоне вращение с одновременной вибрацией [10], что открывает новую область совершенствования ЖМ.

**Цель исследования** – повышение производительности и энергетической эффективности ЖМ с электроприводом на базе ПДАД.

**Материал и методы.** Оценка известных работ [8, 11, 12] даёт варианты ЖМ с ПДАД в приводе (рис. 1).

ЖМ по конструктивному исполнению можно разделить на четыре вида: с вертикальной осью вращения, вращающимся верхним жёрновом (рис. 1 А); с вертикальной осью вращения, вращающимся нижним жёрновом (рис. 1 Б); с вертикальной осью вращения, вращающимися верхним и нижним жерновами (рис. 1 В); с горизонтальной осью вращения (рис. 1 Г).

Для практической реализации выбраны разновидности компоновки ПДАД с ЖМ: с вращающимся жёрновом [10] (рис. 2 А), с двумя вращающимися жерновами [13] (рис. 2 Б).

В ЖМ с вертикальной осью вращения (рис. 1 А) зерно раздавливается весом камня, и на основании мельницы приходится малое давление. Данный вариант компоновки ЖМ с ПДАД в электроприводе взят за основу при последующих расчётах.

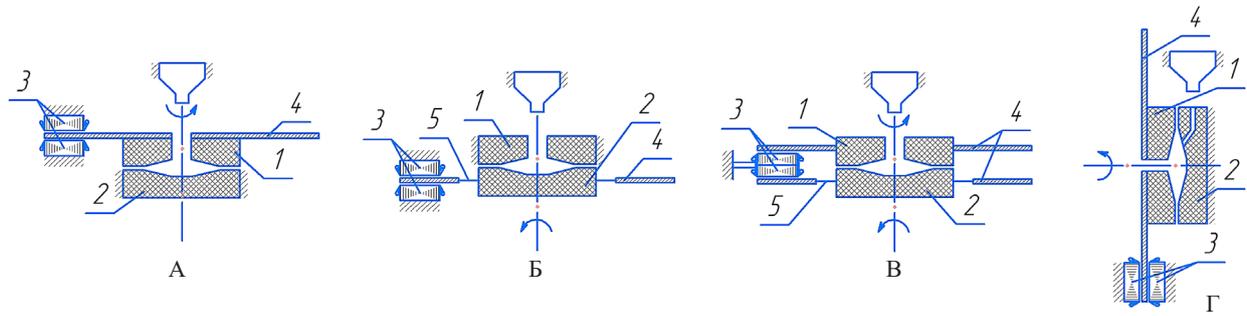


Рис. 1 – Варианты ЖМ с ПДАД в приводе:

А, Б, В – мельницы с вертикальной осью вращения жерновов; Г – мельница с горизонтальной осью вращения жерновов: 1 – верхний жёрнов, 2 – нижний жёрнов, 3 – индукторы ПДАД, 4 – вторичный элемент ПДАД, 5 – зона выхода муки

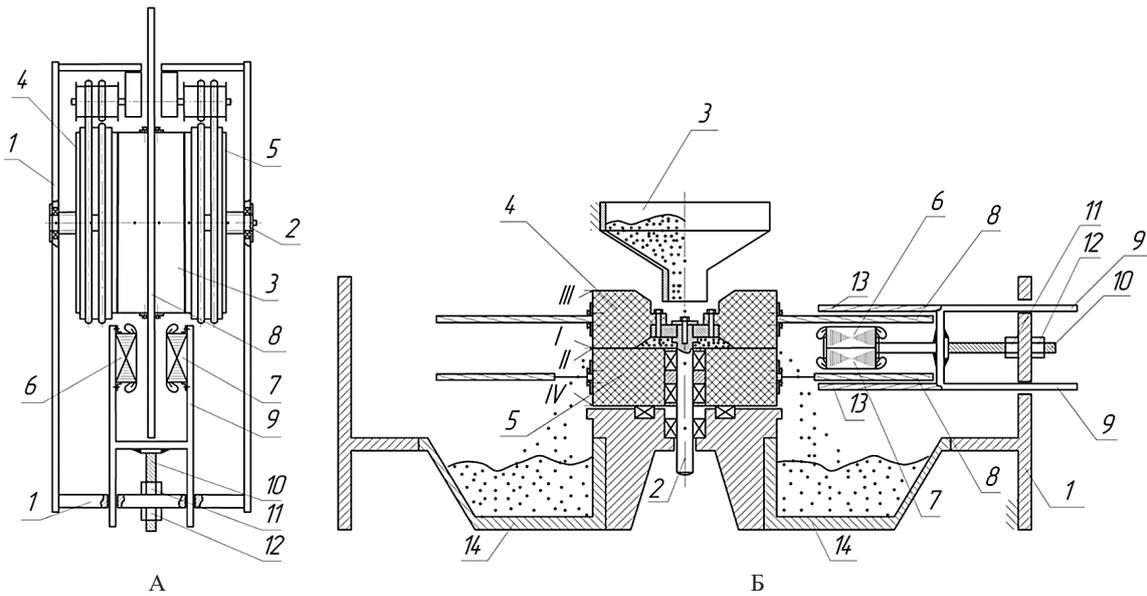


Рис. 2 – Разновидности ЖМ с ПДАД в электроприводе (схематично):

А – с одним вращающимся жёрновом: 1 – корпус; 2 – ось; 3 – вращающийся жёрнов; 4, 5 – неподвижные жернова; 6, 7 – индукторы ПДАД; 8 – вторичный элемент ПДАД (алюминиевый диск); 9 – рама; 10 – регулировочный винт; 11, 12 – фиксирующие гайки;  
 Б – с двумя вращающимися в противоположные стороны верхним и нижним жерновами: 3 – загрузочный бункер; 4, 5 – верхний и нижний жернова; 13 – ферромагнитные элементы ПДАД; 14 – приёмные ёмкости; I, II, III, IV – мелющие поверхности жерновов

Проектная схема электропривода ЖМ с ПДАД с указанием сил, действующих на жёрнов, приведена на рисунке 3.

На основе расчётной схемы можно записать уравнение, описывающее движение рабочего органа (жёрнова), которое может быть представлено в виде [14]:

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

где  $J$  – момент инерции вторичного элемента ПДАД, кг·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

ПДАД работает в установившемся режиме, индуктор ПДАД по длине много меньше длины периметра ротора, поэтому  $F$ , может быть определена по уравнению Клосса, составленному по схеме замещения асинхронного двигателя вращения:

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

где  $F_k = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot \epsilon_0 \cdot R_2'}{2 \cdot \tau \cdot f_1}$  – максимальная сила ПДАД, Н;

$I_1$  – ток индуктора, А;

$\epsilon_0$  – добротность двигателя;

$R_2'$  – приведённое активное сопротивление вторичного элемента, Ом;

$\tau$  – полюсное деление ПДАД, м;

$f_1$  – частота питающей сети, Гц;

$s_k = 1/\epsilon_0$  – критическое скольжение ПДАД;  $v_1$  – линейная скорость электромагнитного поля ПДАД, м/с;

$g = \frac{2R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2' + X_1 X_2' / X_m)^2}}$  – параметр ПДАД;

$\dot{x}(t)$  – линейная скорость, м/с;  
 $R_1$  и  $X_1$  – активное и реактивное сопротивление фазы индуктора;  
 $X_2'$  – приведённое реактивное сопротивление вторичного элемента;  
 $X_m$  – сопротивление взаимоиндукции между индуктором и вторичным элементом.

При работе ПДАД возникает КЭ. По одномерной модели А.И. Вольдека [15], электрическая схема замещения фазы ПДАД имеет вид, отражённый на рисунке 4.

В электрической схеме замещения присутствует сопротивление  $Z_{КЭ}$ , которое определяет КЭ в ПДАД:

$$Z_{КЭ} = \frac{-(R_2' + jX_2')}{2p\pi} \left[ \frac{\lambda - \eta - j}{2\lambda(\lambda + \eta + j)} (1 - e^{-(\lambda + \eta)2p\pi}) + \frac{\lambda + \eta + j}{2\lambda(\lambda - \eta - j)} (1 - e^{-(\lambda - \eta)2p\pi}) \right], \quad (3)$$

где  $\lambda = \sqrt{\eta^2 + j\epsilon_0}$  – комплексное слагаемое;

$\eta = \frac{\epsilon_0}{2}(1 - s)$  – вещественное число;

$p$  – число пар полюсов ПДАД;

$s$  – скольжение.

Амплитудное значение  $F_{КЭ}$ , обусловленное отражённой волной бегущего магнитного поля, имеет вид:

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

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

$F_{в.тр}$  может быть найдено согласно инженерной реологии течением жидкости от слоя к слою в виде [16]:

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

где  $\beta = \frac{h_0 \cdot \rho + 4\sigma \cdot f_v \cdot g_3 \cdot R_{ж}}{4 \cdot \dot{\gamma}}$  – коэффициент вязкого

трения, Н·с/м;

$h_0$  – экспериментальный коэффициент, определяемый по высоте столба зерна, м;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\sigma$  – напряжение сжатия, кг/м<sup>2</sup>;

$f_v$  – коэффициент внутреннего трения;

$\dot{\gamma}$  – скорость сдвига, с<sup>-1</sup>;

$g_3$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$R_{ж}$  – радиус жерновов, м;

$F_{с.тр}$  определяется по закону Ш. Кулона:

$$F_{с.тр} = f_c \cdot N, \quad (6)$$

где  $f_c = \text{tg}\varphi$  – коэффициент трения зерна и камня жернова;

$\varphi$  – угол трения;

$N = m \cdot g_3$  – сила нормального давления, Н;

$m = m_{ж} + m_3$  – масса подвижного жернова и зерна, находящегося в рабочей зоне, кг.

При значениях  $s_k \approx 0,2-0,4$  сила ПДАД может быть найдена по формуле:

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

где  $B_0, B_1, B_2$  – коэффициенты, которые находятся по зависимостям:

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

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

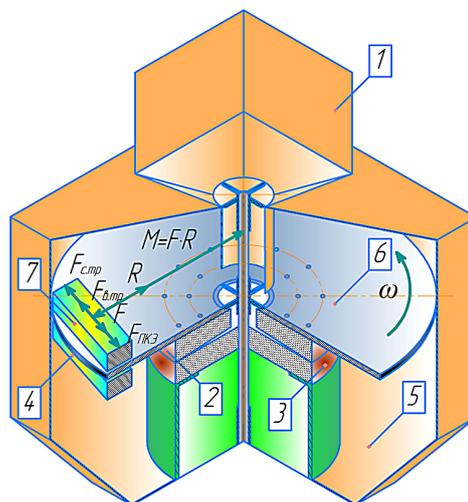


Рис. 3 – Проектная схема электропривода ЖМ с ПДАД:

1 – загрузочный бункер; 2 – верхний подвижный жёрнов; 3 – нижний неподвижный жёрнов; 4, 7 – индукторы ПДАД; 5 – разгрузочный бункер; 6 – вторичный элемент ПДАД;  $M$  – момент вращения, Н·м;  $R$  – расстояние индукторов ПДАД от оси жернова, м;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;  $F$  – сила ПДАД,  $H$ ;  $F_{КЭ}$  – сила концевого эффекта ПДАД,  $H$ ;  $F_{в.тр}$  – сила вязкого трения, Н;  $F_{с.тр}$  – сила сухого трения, Н

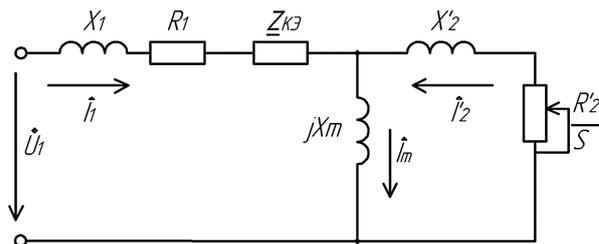


Рис. 4 – Электрическая схема замещения ПДАД с учётом КЭ:

$Z_{КЭ}$  – сопротивление, характеризующее КЭ

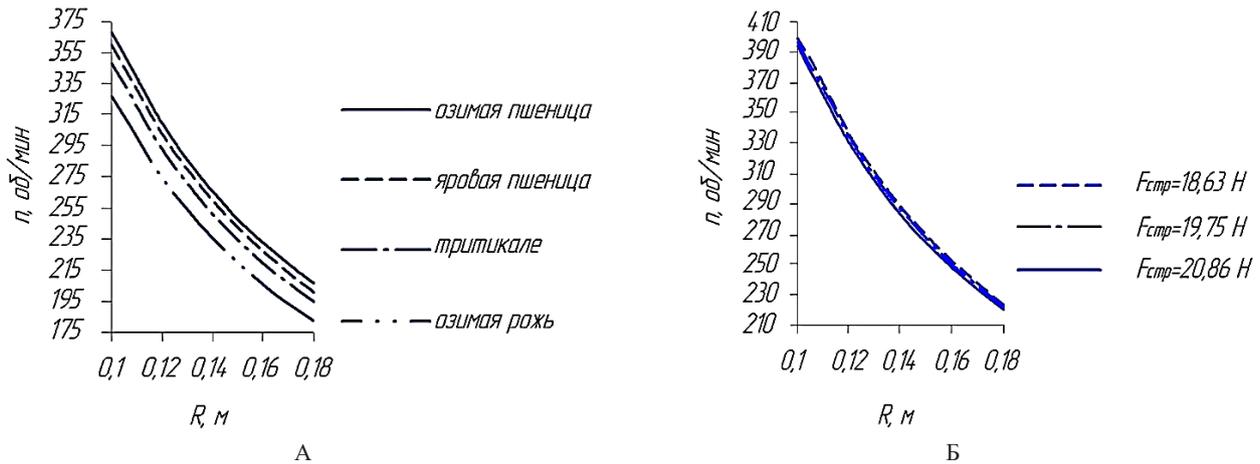


Рис. 5 – Влияние на скорость вращения жёрнова расстояния индукторов ( $R$ , м):  
 А – коэффициента вязкого трения –  $\beta$ , Н·с/м; Б – силы сухого трения –  $F_{с,тр}$ , Н

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

Тогда уравнение движения жерновов (1) без учёта КЭ имеет вид:

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

Дифференциальное уравнение (8) есть уравнение Рикатти, имеет решение в виде:

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

$$\text{где } Y = \sqrt{\frac{(\beta - F_k B_1)^2}{4(F_k B_2)^2} - \frac{F_k B_0 - F_{с,тр}}{F_k B_2}},$$

$$\frac{d}{2f} = -\frac{\beta - F_k B_1}{2F_k B_2} - \text{безразмерные параметры.}$$

Производительность можно найти по выражению:

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

где  $k_1$  – коэффициент производительности (обычно  $k_1 = 0,7$ );

$k_2$  – коэффициент скорости вращения ( $k_2 = 0,01$ );

$\psi$  – коэффициент заполнения зоны измельчения зерном между жерновами ( $\psi = 0,7 \div 0,8$ );

$\rho$  – плотность измельчаемого зерна, кг/м<sup>3</sup>;

$D_d$  – наружный диаметр жернова, м;

$\delta_{ж}$  – зазор между жерновами, м.

Математическая модель движения электропривода с учётом КЭ в ПДАД ( $F_{КЭ} \neq 0$ , при  $p \leq 4$ ), решается методами численного интегрирования в среде Matlab (Simulink) [17].

**Результаты исследования.** При решении уравнения движения (1) с учётом КЭ выявлено, что сила ПДАД уменьшается на 4,9–7,6 %. Следовательно, при инженерных расчётах скорость вращения жёрнова можно найти по выражению (9).

Установлено, что наибольшее влияние на процесс помола оказывает вязкое трение. Наибольшую силу сопротивления оказывает озимая рожь, коэффициент вязкости которой находится в пределах от 93,0 ÷ 93,4 Н·с/м, а наименьшее сопротивление – озимая пшеница – 39,8 ÷ 40,4 Н·с/м. При диаметрах жерновов  $\leq 0,2$  м сила сухого трения незначительна и ею можно пренебречь (рис. 5).

Электропривод с ПДАД позволяет регулировать момент вращения жерновов (рис. 6), при расположении индукторов 0,1 м от оси мельницы достигается момент вращения 81,53 Н·м, а при 0,18 м – 146,75 Н·м.

Найдены корреляции производительности от скорости вращения жерновов при варьировании коэффициента заполнения пространства измельчения  $\psi$  от 0,7 до 0,8; зазора между рабочими органами от 0,001 до 0,0015 м (рис. 7).

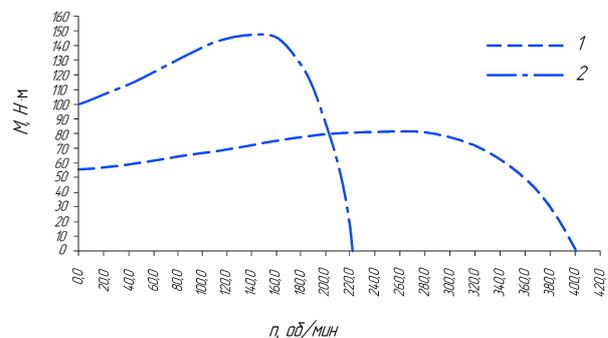


Рис. 6 – Механические характеристики ПДАД при изменении расстояния ( $R$ ) индукторов: 1–0,1 м от оси мельницы; 2–0,18 м от оси мельницы

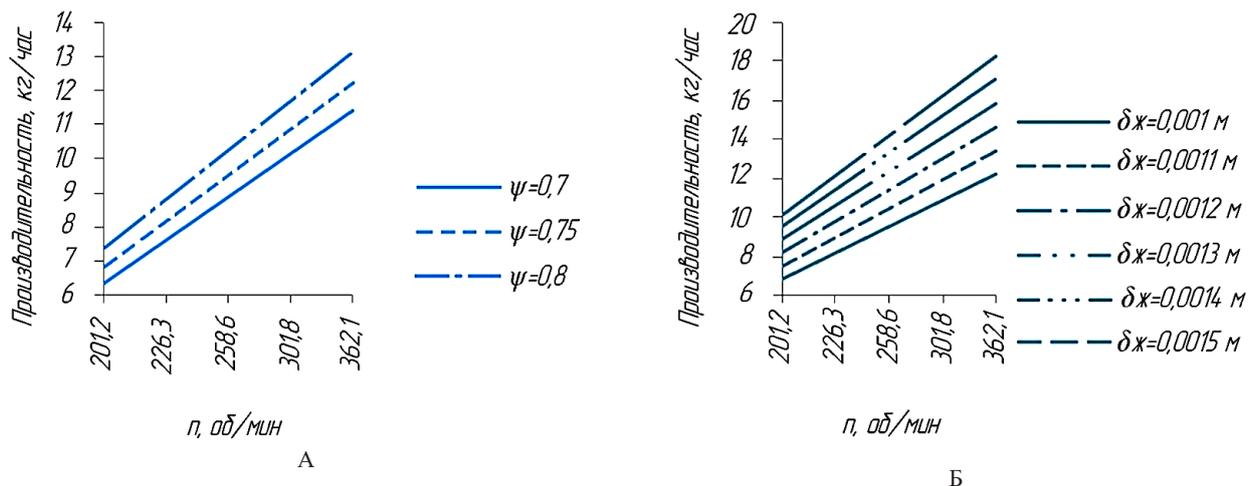


Рис. 7 – Влияние на производительность мельницы:  
 А – коэффициента заполнения пространства измельчения ( $\psi$ ); Б – зазора между рабочими органами ( $\delta_j$ )

Наибольшее возрастание производительности ЖМ с ПДАД имеет место при изменении зазора между рабочими органами от 0,001–0,0015 м (1–1,5 мм). При этом существует недостаток: возрастает количество крупных частиц в муке, поэтому целесообразно оставить зазор в пределах от 0,001–0,0012 м (1–1,2 мм).

ПДАД при  $p \leq 4$  создаёт силу КЭ при скорости, равной или выше синхронной (рис. 8). Этот эффект проявляется в виде стоящих волн электромагнитной силы с частотой колебаний в 100 Гц [9, 13].

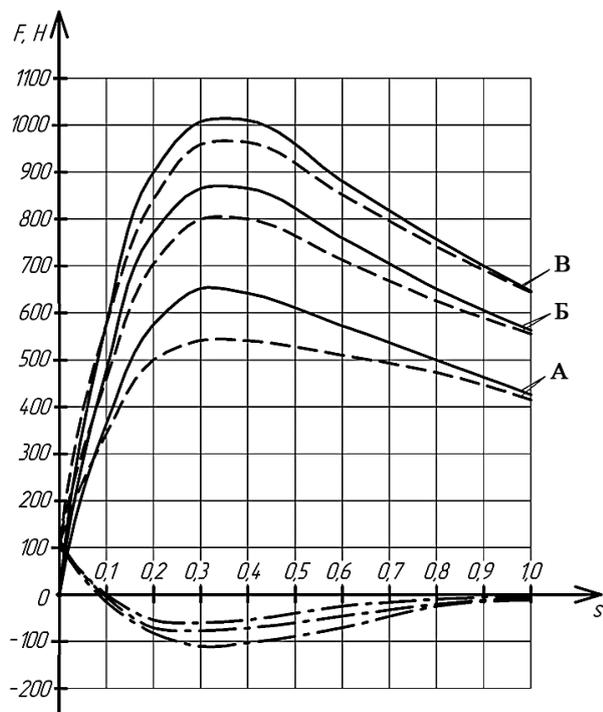


Рис. 8 – Влияние КЭ на силу ПДАД от числа пар полюсов:  
 А –  $p=1, X_m=1,51\text{ Ом}$ ; Б –  $p=2, X_m=1,92\text{ Ом}$ ; В –  $p=3, X_m=2,19\text{ Ом}$

**Выводы.** Рассмотрены варианты ЖМ с ПДАД в электроприводе. Создана математическая модель ЖМ с ПДАД в электроприводе, работающая в установившемся режиме. Сила ПДАД определялась по полному уравнению Клосса, составленному по классической схеме замещения асинхронного двигателя. Рассмотрен подход к аналитическому решению математической модели, когда сила ПДАД при критическом скольжении от 0,2–0,4 аппроксимировалась квадратичной функцией. Для учёта КЭ в схему замещения ПДАД вводилось комплексное сопротивление по одномерной модели А.И. Вольдека. Проведены исследования электропривода ЖМ с учётом особенностей исполнения двигателя; измельчаемой зерновой культуры, сил вязкого и сухого трения. Доказано, что применение ПДАД позволяет изменять как скорость вращения жерновов, так и развиваемого жерновыми момента.

Выполненные исследования дают рекомендации по применению ПДАД в электроприводе технологических машин с вращающимися рабочими органами с низкой скоростью.

**Литература**

1. Nutritional Impacts of Different Whole Grain Milling Techniques: A Review of Milling Practices and Existing Data / Julie Miller Jones, Judi Adams, Cynthia Harriman, Chris Miller, Jan Willem Van der Kamp // Cereal Foods World. 2015. Т. 60. № 3. P. 130–139.
2. Carbohydrates and vitamins from grains and their relationships to mild cognitive impairment, Alzheimer’s disease, and Parkinson’s disease. Jones J.M., Korczak R., Pern R.J., Braun H.J. Cereal Foods World. 2017. Т. 62. № 2. С. 65–75.
3. Вельтишев В.Н., Калошин Ю.А. Основы расчёта и конструирования машин и аппаратов пищевых производств. Ч. 2. Машины для выполнения процессов измельчения, прессования и перемешивания: учебно-практическое пособие. М.: МГУТУ, 2005.
4. Борщёв В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учеб. пособ. Тамбов: Изд.-во Тамбовского государственного технического университета, 2004. 75 с.

5. Study on the optimization of linear induction motor traction system for fast-speed maglev train / Yang Y., Deng J., Tong L., Li X., Peng Q., Zhang W. *Транспортные системы и технологии*. 2018. Т. 4. № 3 S1. P. 156–164.
6. Jang-Kyung Son, Tae-Won Chun, Hong-Hee Lee, Heung-Geun Kim, Eui-Cheol Nho. Method of estimating precise piston stroke of linear compressor driven by PWM inverter. *Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*. 2014 16th International, pp. 673–678.
7. Design, in-sodium testing and performance evaluation of annular linear induction pump for a sodium cooled fast reactor. Nashine B.K., Rao V.P.C. *Annals of Nuclear Energy*. 2014. Т. 73. С. 527–536.
8. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. *Линейные асинхронные двигатели: учеб. пособ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.*
9. New MRAS secondary time constant tuning for vector control of linear induction motor considering the end effects. Benmohamed F.E., Bousserhane I.K., Kechich A., Bessaih B., Boucheta A. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2016. Т. 35. № 5. P. 1685–1723.
10. Пат. № 2482920 Российская Федерация, МПК В02С7/16. Устройство для измельчения твёрдых материалов / Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р.; заявит. и патентооблад.: Р.С. Аипов (RU), Р.Р. Нугуманов (RU) – № 2012106826/13; заявл. 24.02.2012; опубл. 27.05.2013; Бюл. № 15. 7 с.
11. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П.Н. *Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учеб. пособ. Екатеринбург: Изд-во УГТУ – УПИ, 2001. 236 с.*
12. Линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями для энергоэффективных технологий / А.Ю. Коняев, Б.А. Сокунов, Ж.О. Абдуллаев [и др.] // *Промышленная энергетика*. 2017. № 4. С. 2–7.
13. Пат. № 2546860 Российская Федерация, МПК В02С7/08, В02С7/16. Устройство для измельчения / Аипов Р.С., Нугуманов Р.Р., Линенко А.В.; заявит. и патентооблад.: Р.С. Аипов (RU), Р.Р. Нугуманов (RU), А.В. Линенко (RU) – №2013153279/13; заявл. 29.11.2013; опубл. 10.04.2015; Бюл. № 10. 7 с.
14. Flat linear asynchronous electric drive millstone mill for grain. Aipov R.S., Nugumanov R.R., Sapsalev A.V., Zharkov M.A. // *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. 2019. pp. 8949993.
15. Вольдек А.И., Толвинская Е.В. *Основы теории и методики расчёта характеристик линейных асинхронных машин // Электричество*. 1975. № 9. С. 29–36.
16. Косой В.Д., Виноградов Я.И., Малышев А.Д. *Инженерная реология биотехнологических сред: учебник*. СПб.: ГИОРД, 2005. 648 с.
17. Герман-Галкин С.Г. *Matlab & Simulink. проектирование мехатронных систем на ПК*. СПб: Корона-Век, 2014. 368 с.

**Рустам Сагитович Аипов**, доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». Россия, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, aipovrs@mail.ru

**Раушан Римович Нугуманов**, кандидат технических наук, старший преподаватель. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». Россия, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, nugraush@rambler.ru

**Rustam S. Aipov**, Doctor of Technical Sciences, Professor. Bashkir State Agrarian University. 34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa, 450001, Russia, aipovrs@mail.ru

**Raushan R. Nugumanov**, Candidate of Technical Sciences, senior lecturer. Bashkir State Agrarian University. 34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa, 450001, Russia, nugraush@rambler.ru