

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВАЛЬЦОВОЙ ПЛЮЩИЛКИ- ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

В.А. Дайнеко, канд. техн. наук, доцент, Е.М. Прищепова, аспирантка, Н. А. Воробьев, канд. техн. наук, доцент (БГАТУ)

### Аннотация

*В статье приведены результаты теоретических исследований мощности вальцовой плющилки-измельчителя зерна различных конструкций. По результатам исследований получены зависимости для расчета мощности плющилок-измельчителей при различных значениях скоростей и диаметров вальцов, межвальцового зазора, а также наклона плоскости, проходящей через оси вальцов к горизонтальной плоскости. Проанализированы соотношения мощностей на вальцах, вращающихся с различной скоростью, затрачиваемых на сдвиг и проскальзывание зерна.*

*The results of theoretical investigations of rolling power of crushing grain machine of different constructions are given. Dependence for calculation of power of crushing machine with various force of speed and diameter of rolling presses, interstice, and inclination of surface is found. Correlation of power based on rolling, rotating with various speed has been analysed.*

### Введение

Применение плющилки зерна одновременно и в качестве измельчителя позволит увеличить время загрузки оборудования, что повысит эффективность его использования. Но при этом в процессе измельчения возрастут затраты энергии на сдвиг зерновки в межвальцовом пространстве, а также на проскальзывание вальцов по зерновке. Кроме того, при измельчении зерна используется сухое зерно, обладающее более высокими прочностными свойствами, т.е. большим значением модуля упругости.

Обеспечение высокопроизводительной, надежной и экономичной работы вальцовой плющилки-измельчителя зерна возможно только при совместном проектировании электропривода, рабочей машины и технологических процессов плющения и измельчения зерна.

Определение мощности, выбор системы электропривода и электродвигателя являются наиболее ответственными и трудоемкими этапами проектирования электропривода. Так, применение двигателей завышенной мощности приводит к увеличению капитальных затрат и эксплуатационных расходов, связанных со снижением КПД и коэффициента мощности для асинхронных двигателей. Если выбран двигатель недостаточной мощности, то при этом в нем возникают тепловые перегрузки, ускоренное старение изоляции, снижение надежности работы и преждевременный выход его из строя.

### Основная часть

При определении мощности, идущей на привод вальцов плющилки, в работах [1, 2] рассматривались три составляющие:

1. Мощность трения скольжения  $P_{mp.c}$  поверхности вальцов по зерновке, зависящую от силы трения и длины дуги скольжения;
2. Мощность деформации  $P_d$  зерновки, зависящую от прочностных (физико-механических) свойств зерновки;
3. Мощность, затрачиваемую на преодоление сил трения в опорных подшипниках валов  $P_{mp.n}$ .

Однако в плющилках-измельчителях наряду с указанными мощностями необходимо также учитывать мощность, затрачиваемую на сдвиг зерновки  $P_{сдв}$  и мощность проскальзывания вальцов по зерновке  $P_{проск}$  при сдвиге. Указанные мощности возникают из-за разности линейных скоростей образующих поверхностей вальцов.

Тогда в общем виде мощность привода плющилки-измельчителя равна

$$P_{дв} = \frac{P_{mp.c} + P_d + P_{mp.n} + P_{сдв} + P_{проск}}{\eta}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – КПД привода.

По аналогии с работой [2] из расчетной схемы (рис. 1) видно, что вальцы одинакового диаметра  $D$  вращаются с различными частотами вращения  $n$  и  $n'$ , при этом нажимают на зерновку с силой  $G$ , создаваемой устройством прижатия вальцов. Разложим эту силу на равнодействующую  $F_R$  давления на зерновку под неопределенным пока углом в пределах углов деформации  $\alpha_1$  и  $\alpha_1'$ , на вертикальную силу  $F_Y = F_R \cdot \sin \alpha_1$ , горизонтальную  $F_X = F_R \cdot \cos \alpha_1$  (2) и по касательной к вальцу

$$F_R \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{F_Y}{\cos \alpha_1} = \frac{F_R \cdot \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1}. \quad (3)$$

Под действием силы  $F_R$  на окружности вальца при его вращении возникает сила трения  $F_{mp} = f \cdot F_R$ , которая должна быть больше силы по касательной  $F_R \cdot \operatorname{tg} \alpha_1$ . При этом зерновка сначала будет скользить по вальцам, затем произойдет ее захват вальцами и деформация в межвальцовом зазоре. Так как образующие вальцов имеют различные окружные скорости, то одновременно при деформировании зерновки происходит проскальзывание вальца с наибольшей скоростью по зерновке. Проскальзывание при деформации зерновки будет происходить до тех пор, пока касательные напряжения, действующие на зерновку в межвальцовом пространстве, не превысят предельных. При превышении касательными напряжениями предельного значения произойдет сдвиг зерновки и соответствующее измельчение (разрушение) сплющенного зерна.

Согласно работам [2, 3, 4], можно считать, что весь путь  $l_{AC}$  и  $l_{A'C'}$ , проходимый зерновкой по вальцам, соответственно, с осями вращения  $O$  и  $O'$ , будет состоять из длин дуг скольжения  $l_{BC}$  и  $l_{B'C'}$ , ограниченных соответствующими углами  $\alpha_2$  и  $\alpha_2'$ , длин дуг деформации  $l_{AB}$  и  $l_{A'B'}$ , ограниченных углами деформации  $\alpha_1$  и  $\alpha_1'$ , а также длин дуг сдвига и проскальзывания (на рисунке не показаны), которое будет происходить до тех пор, пока не произойдет сдвиг зерновки в межвальцовом пространстве.

Тогда суммарная мощность трения скольжения вальцов о зерновку будет равна сумме мощностей трения каждого из вальцов, т.е.

$$P_{mp.c} = P_{mp.c.o} + P_{mp.c.o'} \quad (4)$$

Соответственно

$$P_{mp.c.o} = F_{mp.c.o} \cdot \frac{ds_0}{dt_2}; \quad (5)$$

$$P_{mp.c.o'} = F_{mp.c.o'} \cdot \frac{ds_0'}{dt_2'}; \quad (6)$$

где  $s_0$  и  $s_0'$  – пути скольжения зерновки на вальцах с соответствующими осями вращения, м;

$t_2$  и  $t_2'$  – время скольжения зерновки на соответствующих вальцах, с;

$F_{mp.c.o}$  и  $F_{mp.c.o'}$  – силы трения, возникающие при взаимодействии зерновки с поверхностями соответствующих вальцов, Н.

Очевидно, что при одинаковых конструкциях и диаметрах вальцов  $\alpha_1 = \alpha_1'$  и  $f = f'$ :

$$F_{mp.c.o} = F_{mp.c.o'} = \frac{f \left( \frac{mg + F}{2} \right)}{\cos \alpha_1} = \frac{f' \left( \frac{mg + F}{2} \right)}{\cos \alpha_1'}, \quad (7)$$

где  $f$  и  $f'$  – коэффициент трения вальцов о зерновку;

$m$  – масса зерновки, кг;

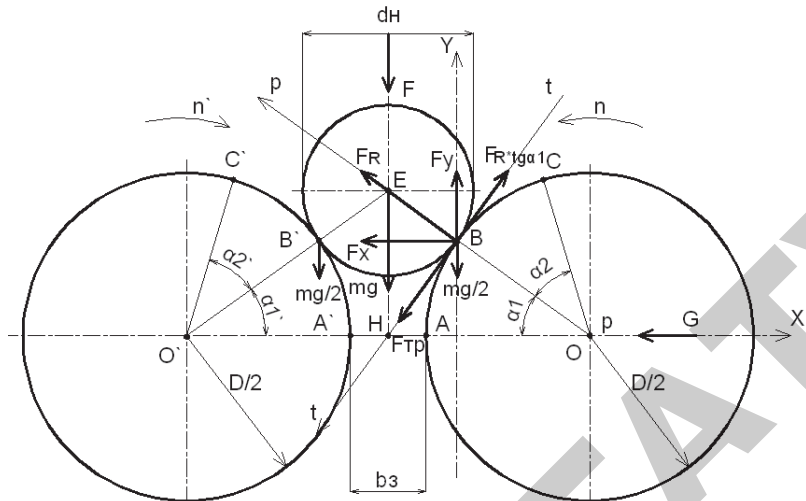


Рисунок 1. Расчетная схема для определения сил, действующих на вальцы плющилки-измельчителя с одинаковыми диаметрами

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;

$\alpha_1$  и  $\alpha_1'$  – углы деформации, рад;

$F$  – дополнительная внешняя сила, действующая на зерновку, Н;

Косинусы углов деформации, выраженные через диаметры вальцов, зерновки и межвальцового расстояния, определим по формуле:

$$\cos \alpha_1 = \cos \alpha_1' = \frac{D + b_3}{D + d_n}, \quad (8)$$

где  $b_3$  – зазор между вальцами, м;

$d_n$  – средняя толщина зерновки, м.

Приращение путей скольжения  $ds_0$  и  $ds_0'$  найдём как

$$ds_0 = \frac{d\alpha_2 D}{2} \quad (9)$$

и

$$ds_0' = \frac{d\alpha_2' D}{2}, \quad (10)$$

где  $\alpha_2$  и  $\alpha_2'$  – углы скольжения на соответствующих вальцах, рад.

Тогда мощность трения скольжения на каждом из вальцов, с соответствующими осями вращения, и суммарная мощность трения скольжения

$$P_{mp.c.o} = \frac{f \cdot (mg + F)}{2} \cdot \frac{d\alpha_2 D}{dt_2}; \quad (11)$$

$$P_{mp.c.o'} = \frac{f' \cdot (mg + F)}{2} \cdot \frac{d\alpha_2' D}{dt_2'} = \quad (12)$$

$$= \frac{f \cdot (mg + F)}{2} \cdot \frac{d\alpha_2' D}{dt_2'}$$

Учитывая, что

$$\frac{d\alpha_2}{dt_2} = \frac{\pi n}{30} \quad (13)$$

и

$$\frac{d\alpha_2'}{dt_2'} = \frac{\pi n'}{30}, \quad (14)$$

$$P_{mp.c} = \frac{f \left( \frac{mg+F}{2} \right)}{\cos \alpha_1} \cdot \frac{d\alpha_2 D}{dt_2 \cdot 2} + \frac{f \left( \frac{mg+F}{2} \right)}{\cos \alpha_1} \cdot \frac{d\alpha_2' D}{dt_2' \cdot 2} =$$

$$= \frac{Df \left( \frac{mg+F}{2} \right)}{2 \cos \alpha_1} \left( \frac{\pi n}{30} + \frac{\pi n'}{30} \right) = \frac{\pi}{60} \frac{f \left( \frac{mg+F}{2} \right) D}{\cos \alpha_1} (n+n') =$$

$$= \frac{\pi Df (mg+F)}{120 \cos \alpha_1} (n+n') \quad (15)$$

Мощность деформации зерновки найдем аналогично работам [1, 2] из выражения:

$$P_D = (f \cdot F_R + f' \cdot F_{R'}) v_3, \quad (16)$$

где  $v_3$  – фактическая скорость зернового потока, определяемая по формуле, приведенной в работе [3]

$$v_3 = \frac{D(1 + \frac{n'}{n})}{\frac{2D}{v} + \frac{2(v-v_0)}{\alpha_1 \left( g + \frac{F}{m} \right) (f \sin \alpha_1 + \cos \alpha_1)} + \frac{2(v'-v_0)}{\alpha_1' \left( g + \frac{F}{m} \right) (f' \sin \alpha_1' + \cos \alpha_1')}} =$$

$$= \frac{2D}{v'} + \frac{2(v-v_0)}{\alpha_1' \left( g + \frac{F}{m} \right) (f' \sin \alpha_1' + \cos \alpha_1')} + \frac{2(v'-v_0)}{\alpha_1' \left( g + \frac{F}{m} \right) (f' \sin \alpha_1' + \cos \alpha_1')} \quad (17)$$

Для определения величины равнодействующих сил  $F_R$  ( $F_{R'}$ ) по аналогии с работами [1, 2, 5] выделим на окружности бесконечно малый элемент  $ds$  под неопределенным пока углом к горизонтالي в пределах угла деформации  $\alpha_1$  и отнесем к осям координат  $YOX$  согласно рис. 2.

Тогда

$$dF_R = \rho L ds, \quad (18)$$

где  $\rho$  – сопротивление сжатия, отнесенное к единице площади, переменное по всей дуге АВ, Н/м<sup>2</sup>.

Согласно закону Гука, сопротивление сжатия можно определить из выражения

$$\rho = E \frac{\frac{d_H \cdot \cos \alpha_1 - x_{\alpha_1}}{2}}{d_H \cdot \cos \alpha_1}, \quad (19)$$

где  $E$  – модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;

$$\frac{x_{\alpha_1}}{2} = \frac{b_3}{2} + x, \quad (20)$$

тогда

$$\rho = E \frac{\frac{d_H \cdot \cos \alpha_1 - b_3}{2} - x}{d_H \cdot \cos \alpha_1}. \quad (21)$$

Вертикальную составляющую  $dF_Y$  равнодействующей силы  $dF_R$  (рис. 3) определим как

$$dF_Y = dF_R \sin \alpha_1 = L \rho dx, \quad (22)$$

тогда

$$F_Y = L \int_0^{\frac{d_H \cdot \cos \alpha_1 - b_3}{2}} \rho dx = E \frac{2L}{d_H \cos \alpha_1} \times$$

$$\times \int_0^{\frac{d_H \cdot \cos \alpha_1 - b_3}{2}} \left( \frac{d_H \cdot \cos \alpha_1 - b_3}{2} - x \right) dx \quad (23)$$

Принимая зерновой поток непрерывным и равным толщине зерновки  $d_H \cdot \cos \alpha_1$ , интегрируем

уравнение (23) в пределах от 0 до  $\frac{d_H \cdot \cos \alpha_1 - b_3}{2}$ .

Тогда получим

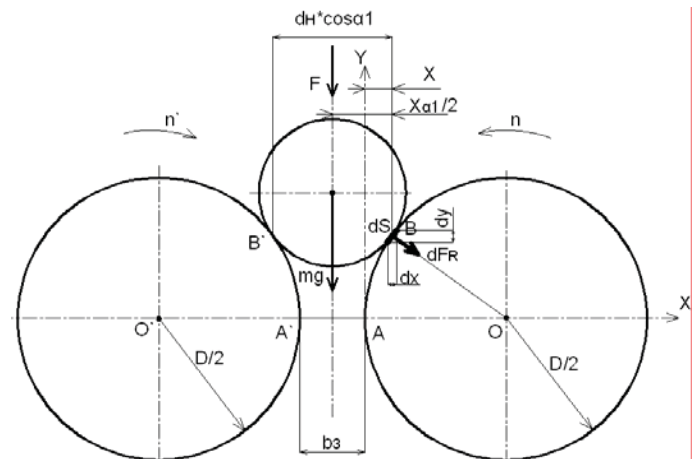


Рисунок 2. Расчетная схема для определения равнодействующей силы  $F_R$ , действующей на вальцы плющилки

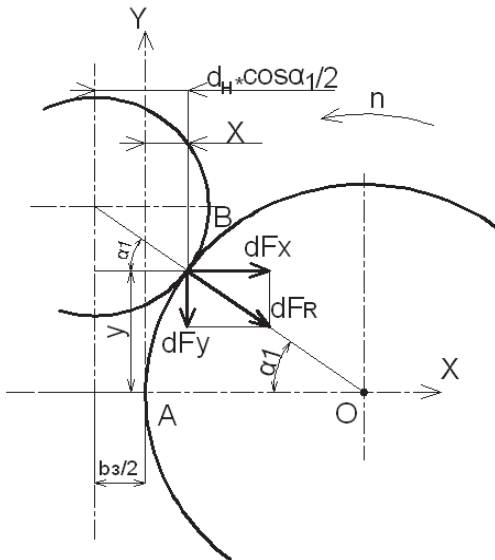


Рисунок 3. Расчетная схема для определения вертикальной составляющей  $F_Y$  равнодействующей  $F_R$ .

$$F_Y = \frac{LE}{4} \frac{(d_n \cdot \cos \alpha_1 - b_3)^2}{d_n \cdot \cos \alpha_1}. \quad (24)$$

Горизонтальную составляющую  $dF_X$  равнодействующей силы  $dF_R$  определим как

$$dF_X = dF_R \cos \alpha_1 = L \rho dy, \quad (25)$$

тогда

$$F_X = L \int_0^{\frac{D}{2} \sin \alpha_1} \rho dy = E \frac{2L}{d_n \cdot \cos \alpha_1} \times \int_0^{\frac{D}{2} \sin \alpha_1} \left( \frac{d_n \cdot \cos \alpha_1 - b_3}{2} - x \right) dy \quad (26)$$

Очевидно, что подинтегральная величина равна элементарной площади  $S_{abcd}$  (рис. 4)

$$S_{abcd} = \left( \frac{d_n \cdot \cos \alpha_1 - b_3}{2} - x \right) dy, \quad (27)$$

тогда

$$F_X = E \frac{2L}{d_n \cos \alpha_1} S_{ABC}. \quad (28)$$

Из рис. 4 видно, что площадь  $S_{ABC}$  равна разнице площадей сектора  $ABO$  и прямоугольного треугольника  $CBO$ :

$$S_{ABC} = \frac{D^2 \alpha_1}{8} - \frac{D^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1}{8}. \quad (29)$$

Тогда с учётом (29) формула для определения  $F_X$  примет вид:

$$F_X = \frac{ELD^2}{4d_n \cos \alpha_1} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1). \quad (30)$$

Следовательно

$$F_R = \sqrt{F_Y^2 + F_X^2} = \frac{EL}{4d_n \cos \alpha_1} \times \sqrt{(d_n \cdot \cos \alpha_1 - b_3)^4 + D^4 (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)^2}. \quad (31)$$

Аналогично можно получить равнодействующую  $F_R'$  на валце с осью вращения  $O'$ . При одинаковых диаметрах валцов  $F_R = F_R'$ .

Тогда мощность деформации зерновки

$$P_o = (f + f') \frac{ELv_s}{4d_n \cos \alpha_1} \times \sqrt{(d_n \cdot \cos \alpha_1 - b_3)^4 + D^4 (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)^2}. \quad (32)$$

Определив равнодействующие силы на валцах  $F_R$  и  $F_R'$ , можно найти силы трения  $F_{mp}$  и  $F_{mp}'$  на соответствующих валцах:

$$F_{mp} = F_R \cdot f; \quad (33)$$

$$F_{mp}' = F_R' \cdot f'. \quad (34)$$

Тогда суммарная мощность, затрачиваемая на привод каждого из валцов

$$\Sigma P = F_{mp} \frac{D}{2} \omega = \frac{\pi}{60} (F_{mp} D n); \quad (35)$$

$$\Sigma P' = F_{mp}' \frac{D}{2} \omega' = \frac{\pi}{60} (F_{mp}' D n'), \quad (36)$$

где  $\omega$  и  $\omega'$  – угловые скорости валцов, рад/с.

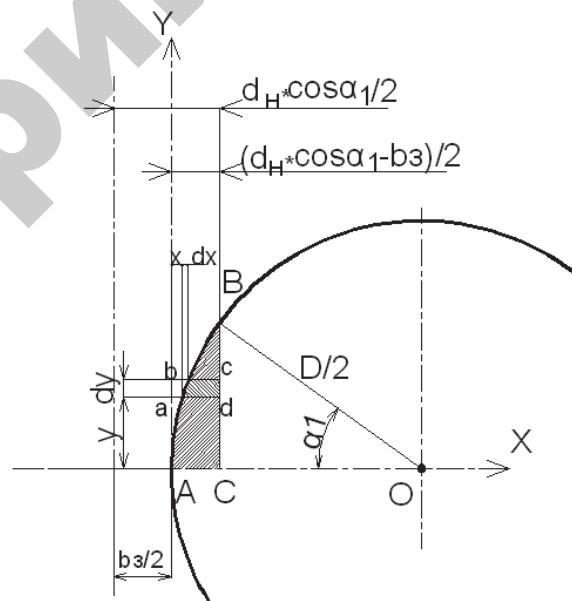


Рисунок 4. Расчетная схема для определения горизонтальной составляющей  $F_X$  равнодействующей  $F_R$ .

Вычитая от большей суммарной мощности одного из валцов меньшую мощность другого вальца можно получить мощность, затрачиваемую на сдвиг зерновки в межвальцовом пространстве  $P_{сдв}$  и мощность проскальзывания по зерновке вальца с большей скоростью  $P_{проск}$ . При одинаковых валцах плющилки-измельчителя большая суммарная мощность затрачивается на вальце с большей угловой скоростью. Если  $\omega > \omega'$ , то

$$\begin{aligned} P_{\text{сдв}} + P_{\text{проск}} &= \Sigma P - \Sigma P' = \\ &= \frac{\pi}{60} (F_{mp} Dn - F_{mp}' Dn') = \\ &= \frac{\pi D F_R}{60} (fn - f'n') \end{aligned} \quad (37)$$

Из анализа выражения (37) очевидно, что эта мощность возрастает с увеличением разности произведения частоты вращения на коэффициент трения вальца с большей угловой скоростью по отношению к вальцу с меньшей скоростью.

Мощность, затрачиваемую на сдвиг зерновки в межвальцовом пространстве, можно вычислить через вертикальные составляющие

$$\begin{aligned} P_{\text{сдв}} &= \frac{\pi}{60} (F_{mp} \cos \alpha_1 Dn - F_{mp}' \cos \alpha_1' Dn') = \\ &= \frac{\pi D F_R \cos \alpha_1}{60} (fn - f'n') \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{проск}} &= (\Sigma P - \Sigma P') - P_{\text{сдв}} = \\ &= \frac{\pi D F_R}{60} (fn - f'n')(1 - \cos \alpha_1) \end{aligned} \quad (39)$$

Анализ выражения (39) показывает, чем больше стремятся к единице  $\cos \alpha_1$  и  $\cos \alpha_1'$ , тем меньше  $P_{\text{проск}}$ , а при  $\cos \alpha_1$  и  $\cos \alpha_1'$  равным единице мощность прокатывания вальца равна 0.

Далее определим минимальное смещение  $\Delta Y$  зерновки в межвальцовом зазоре, при котором произойдет разрушение (измельчение) зерновки:

$$\Delta Y = \frac{\sigma_{\text{max}} l 2(1 + \nu)}{E}, \quad (40)$$

где  $\sigma_{\text{max}} = F_{\text{max}} / S$  – максимальное механическое напряжение, Н/м<sup>2</sup>;

$F_{\text{max}}$  – сила сдвига, достаточная для создания механического напряжения, превышающего предел прочности, Н;

$S$  – площадь поперечного сечения зернового потока, на которое действует сила, м<sup>2</sup>;

$\nu$  – значение коэффициента Пуассона для измельчаемого зерна;

$l$  – среднее значение длины межвальцового пространства, м.

Значение площади поперечного сечения зернового потока и среднее значение длины межвальцового пространства определим из рис. 2 и 4.

$$\begin{aligned} S &= L((AC \cdot CB - S_{ABC}) + (A'C' \cdot C'B' - S_{A'B'C'}) + \\ &+ b_s \frac{CB + C'B'}{2}). \end{aligned} \quad (41)$$

Выразив указанные геометрические параметры через диаметры вальцов и тригонометрические функции углов деформации, получим:

$$\begin{aligned} S &= L \left( \frac{D}{2} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) - \frac{D^2}{8} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) + \right. \\ &+ \frac{D}{2} (\sin \alpha_1' - \sin \alpha_1' \cos \alpha_1') - \frac{D^2}{8} (\alpha_1' - \sin \alpha_1' \cos \alpha_1') + \\ &+ b_s \frac{D}{4} \left( \frac{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_1'}{2} \right) \end{aligned} \quad (42)$$

Тогда среднее значение длины межвальцового пространства

$$l = \frac{2S}{CB + C'B'}. \quad (43)$$

Определив необходимое для измельчения минимальное смещение зерновки  $\Delta Y$ , найдем разницу длин дуг образующих окружностей вальцов, контактирующих с зерновкой при деформации и сдвиге, возникающую из-за разности линейных скоростей образующих вальцов. Для этого определим время контакта зерновки с вальцами после ее захвата вальцами из выражения угловой скорости вальца с меньшей скоростью:

$$\omega' = \frac{d\alpha}{dt} \quad (44)$$

или

$$dt = \frac{30}{\pi n'} d\alpha. \quad (45)$$

Интегрируя выражение (45) по углу деформации от 0 до  $\alpha_1'$  и по времени от 0 до  $t_1'$  запишем:

$$\int_0^{t_1'} dt = \frac{30}{\pi n'} \int_0^{\alpha_1'} d\alpha_1'. \quad (46)$$

$$\text{Тогда } t_1' = \frac{30\alpha_1'}{\pi n'}. \quad (47)$$

Угол деформации и сдвига  $\alpha_1''$  (больше чем угол  $\alpha_1$ , изображенный на рис. 1) для вальца с большей скоростью определим по формуле

$$\alpha_1'' = \frac{\pi n t_1'}{30}. \quad (48)$$

Длины дуг соответствующие углам  $\alpha_1''$  и  $\alpha_1'$ , соответственно:

$$l_{AB}'' = \alpha_1'' \frac{D}{2} = \alpha_1' \frac{D}{2} \frac{n}{n'}; \quad (49)$$

$$l_{A'B'} = \alpha_1' \frac{D}{2}. \quad (50)$$

Тогда разница длин дуг образующих окружностей вальцов, контактирующих с зерновкой при деформации и сдвиге

$$\Delta l = l_{AB}'' - l_{A'B'} = \alpha_1' \frac{D}{2} \left( \frac{n}{n'} - 1 \right) = l_{A'B'} \left( \frac{n}{n'} - 1 \right). \quad (51)$$

Зная  $\Delta l$  и  $\Delta Y$ ,  $F_{\text{max}} = \sigma_{\text{max}} S$  и действующую силу сдвига  $F_{\text{сдв. действ}}$ , можно судить о процессе измельчения.

Действующую силу сдвига можно определить из баланса энергии, затрачиваемой электроприводом на сдвиг.

$$F_{\text{сдв.действ}} = \frac{P_{\text{сдв}} t_1'}{\Delta Y} = \frac{EF_R \cos \alpha_1 \cdot \alpha_1'}{4\sigma_{\text{max}} l n'(1+\nu)} (fn - f'n'). \quad (52)$$

Если  $\Delta l > \Delta Y$  и  $F_{\text{сдв.действ}} > F_{\text{max}}$ , то происходит процесс измельчения. И чем в большей степени выполняются эти неравенства, тем интенсивнее происходит этот процесс. Далее определим, при каких соотношениях частот вращения валцов начинается процесс измельчения зерна

$$l_{A'B'} \left( \frac{n}{n'} - 1 \right) > \Delta Y \quad (53)$$

или

$$n > n' + \frac{\Delta Y n'}{l_{A'B'}} \quad (54)$$

Подставив в неравенство (54) выражения (40), (50) и проведя преобразования, получим

$$n > n' + \frac{2\Delta Y n'}{\alpha_1' D} = n' + \frac{4\sigma_{\text{max}} l(1+\nu)n'}{E\alpha_1' D} \quad (55)$$

или

$$n - n' > \frac{2\Delta Y n'}{\alpha_1' D} = \frac{4\sigma_{\text{max}} l(1+\nu)n'}{E\alpha_1' D}. \quad (56)$$

Анализируя выражение (56) можно утверждать, что разность частот вращения вальца с большей скоростью по отношению к вальцу с меньшей скоростью прямопропорциональна максимальному механическому напряжению зерновки  $\sigma_{\text{max}}$ , длине межвальцового пространства  $l$ , коэффициенту Пуассона  $\nu$  и частоте вращения вальца с меньшей скоростью; обратнопропорциональна – модулю Юнга  $E$ , диаметру вальца  $D$  и углу деформации зерновки вальца с меньшей скоростью  $\alpha_1'$ . Остальные составляющие мощности, затрачиваемой на привод валцов плющилки-измельчителя для рассматриваемой и других конструкций, получены аналогично с учетом выражений, полученных в работах [2,3], и представлены в табл. 1. В формулах определения мощности, затрачиваемой на преодоление сил трения в опорных подшипниках валцов, приведенных в табл. 1, используются следующие ранее не используемые по тексту обозначения:

$G_{\text{вo}} = m_{\text{вo}} g$  – вес вальца с осью вращения  $O$ , Н;

$G_{\text{вo}'}$  – вес вальца с осью вращения  $O'$ , Н;

$m_{\text{вo}}, m_{\text{вo}'}$  – массы соответствующих валцов, кг;

$f_{\text{пр.o}}$  – приведенный коэффициент трения подшипников соответствующего вальца;

$d_{\text{ц.o}}, d_{\text{ц.o}'}$  – диаметры цапф соответствующих валцов, м;

$F_{\text{x.o}}, F_{\text{x.o}'}$  – горизонтальные составляющие равнодействующей на валцах, соответственно, с осями вращения  $O$  и  $O'$ , Н.

## Малогабаритная система очистки рабочих жидкостей гидравлических систем

**Предназначена** для профилактической очистки рабочих жидкостей гидравлических приводов мобильной сельскохозяйственной техники.

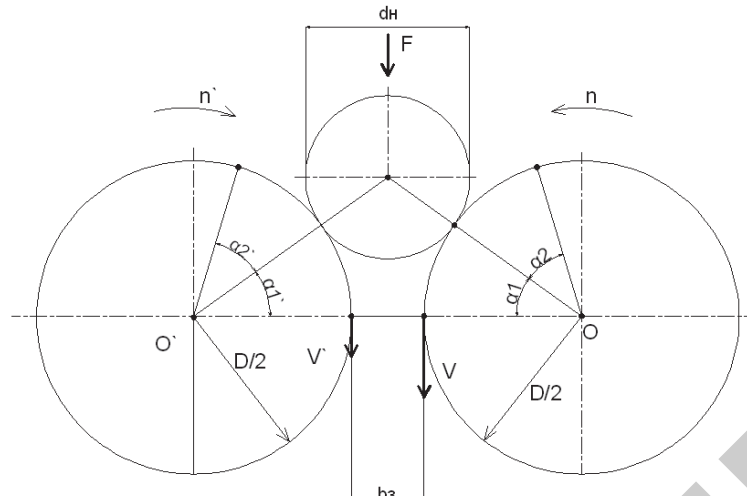


### Основные технические данные

|  |                   |
|--|-------------------|
| Производительность                         | Не менее 24 л/мин |
| Давление на входе в блок центрифугирования | 0,8 МПа           |
| Давление на входе в блок фильтрования      | 0,2-0,3 МПа       |
| Давление на выходе из блока фильтрования   | 0,15 МПа          |
| Тонкость очистки                           | 15-40 мкм         |

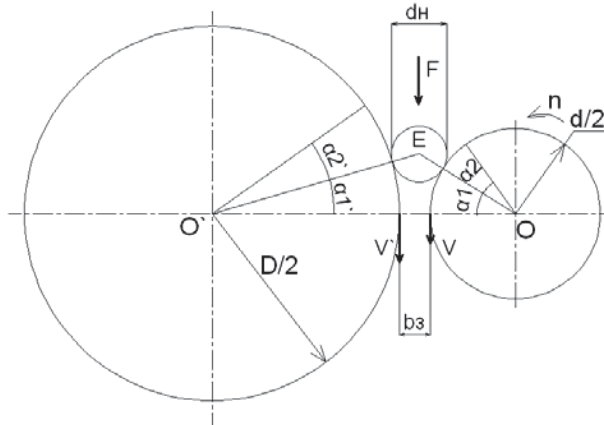
Применение системы позволяет при обкатке двигателей расходовать масло без остатка, не снижать качество повторно используемого моторного масла, постоянно добавляя в него свежее товарное масло (гомогенизировать), полностью устранить расход электроэнергии, необходимой для подогрева масла, отказаться от необходимости хранения и утилизации масла. Она может применяться на ремонтно-обслуживающих предприятиях, а также непосредственно в хозяйствах для технического обслуживания машинно-тракторного парка.

Таблица 1

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <p>Расчетные схемы</p>   | <p>1</p>  <p> <math>v &gt; v'</math><br/> <math>n &gt; n'</math><br/> <math>f \neq f'</math><br/> <math>\alpha_1 = \alpha_1'</math><br/> <math>F_{R.O} = F_{R.O'}</math> </p>  |
| <p>Расчетные формулы</p> | <p>2</p> $P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{мп.с}} + P_{\text{д}} + P_{\text{сдв}} + P_{\text{проск}} + P_{\text{мп.н}}}{\eta} \quad P_{\text{мп.с}} = \frac{\pi D (mg + F)}{120 \cos \alpha_1} (fn + f'n')$ $v_3 = \frac{2D + \frac{D(1 + \frac{n'}{n})}{v} + \frac{2(v - v_0)}{\alpha_1 \left( g + \frac{F}{m} \right) (f \sin \alpha_1 + \cos \alpha_1)} + \frac{2(v' - v_0)}{\alpha_1' \left( g + \frac{F}{m} \right) (f' \sin \alpha_1' + \cos \alpha_1')}}{D(1 + \frac{n}{n'})} =$ $= \frac{2D + \frac{2(v - v_0)}{\alpha_1' \left( g + \frac{F}{m} \right) (f \sin \alpha_1 + \cos \alpha_1)} + \frac{2(v' - v_0)}{\alpha_1' \left( g + \frac{F}{m} \right) (f' \sin \alpha_1' + \cos \alpha_1')}}{D(1 + \frac{n}{n'})}$ $F_R = \frac{EL}{4d_n \cos \alpha_1} \sqrt{(d_n \cdot \cos \alpha_1 - b_3)^4 + D^4 (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)^2}$ $P_{\text{д}} = (f + f') F_R v_3$ $P_{\text{сдв}} + P_{\text{проск}} = \frac{\pi D F_R}{60} (fn - f'n')$ $P_{\text{сдв}} = \frac{\pi D F_R \cos \alpha_1}{60} (fn - f'n') \quad P_{\text{проск}} = \frac{\pi D F_R}{60} (fn - f'n') (1 - \cos \alpha_1)$ $P_{\text{мп.н}} = \frac{\pi}{30} (\sqrt{F_{X.O}^2 + G_{B.O}^2} f_{\text{мп.о}} d_{y.o} n + \sqrt{F_{X.O'}^2 + G_{B.O'}^2} f_{\text{мп.о'}} d_{y.o'} n')$ $F_{X.O} = F_{X.O'} = \frac{LED^2}{4d_n \cdot \cos \alpha_1} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)$ |

Расчетные схемы

1



$$\begin{aligned} v' > v \\ n \neq n' \\ f \neq f' \\ \alpha_1 \neq \alpha_1' \\ F_{R,O} \neq F_{R,O'} \end{aligned}$$

Расчетные формулы

2

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{mp.c} + \Sigma P_{\text{д}} + P_{\text{сдв}} + P_{\text{проск}} + P_{mp.n}}{\eta}$$

$$\begin{aligned} P_{mp.c} &= \frac{\pi}{60} \left( \frac{f((m-m')g + (F-F'))nd}{\cos \alpha_1} + \frac{f'(m'g + F')n'D}{\cos \alpha_1'} \right) = \\ &= \frac{\pi}{60} \left( f \frac{\cos \alpha_1'}{\cos^2 \alpha_1} (m'g + F')nd + f' \frac{1}{\cos \alpha_1'} (m'g + F')n'D \right) \end{aligned}$$

$$\Sigma P_{\text{д}} = \frac{d}{\frac{d}{v} + \frac{v - v_0}{\alpha_1 \left( g + \frac{F-F'}{m-m'} \right) (f \sin \alpha_1 + \cos \alpha_1)} + \frac{v' - v_0}{\alpha_1' \left( g + \frac{F'}{m'} \right) (f' \sin \alpha_1' + \cos \alpha_1')}} \times \frac{EL}{4} (F_{R,O} f + F_{R,O'} f')$$

$$\Sigma P_{\text{д}} = \frac{D}{\frac{D}{v'} + \frac{v - v_0}{\alpha_1' \left( g + \frac{F-F'}{m-m'} \right) (f \sin \alpha_1 + \cos \alpha_1)} + \frac{v' - v_0}{\alpha_1' \left( g + \frac{F'}{m'} \right) (f' \sin \alpha_1' + \cos \alpha_1')}} \times \frac{EL}{4} (F_{R,O} f + F_{R,O'} f')$$

$$P_{\text{сдв}} + P_{\text{проск}} = \frac{\pi}{60} (F_{R,O'} f' D n' - F_{R,O} f d n) \quad P_{\text{сдв}} = \frac{\pi}{60} (F_{R,O'} \cos \alpha_1' f' D n' - F_{R,O} \cos \alpha_1 f d n)$$

$$P_{\text{проск}} = \frac{\pi}{60} (F_{R,O'} f' D n' (1 - \cos \alpha_1') - F_{R,O} f d n (1 - \cos \alpha_1))$$

$$P_{mp.n} = \frac{\pi}{30} (\sqrt{F_{X,O}^2 + G_{B,O}^2} f_{np,O} d_{y,O} n + \sqrt{F_{X,O'}^2 + G_{B,O'}^2} f_{np,O'} d_{y,O'} n')$$

$$F_{X,O} = \frac{LEd^2}{4d_n \cos \alpha_1} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) \quad F_{X,O'} = \frac{LED^2}{4d_n \cos \alpha_1'} (\alpha_1' - \sin \alpha_1' \cos \alpha_1')$$

$$F_{R,O} = \frac{EL(d_n \cos \alpha_1 - b_3)^2}{4d_n \cos \alpha_1} \sqrt{1 + \left( \frac{d}{d_n \cos \alpha_1 - b_3} \right)^4 (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)^2}$$

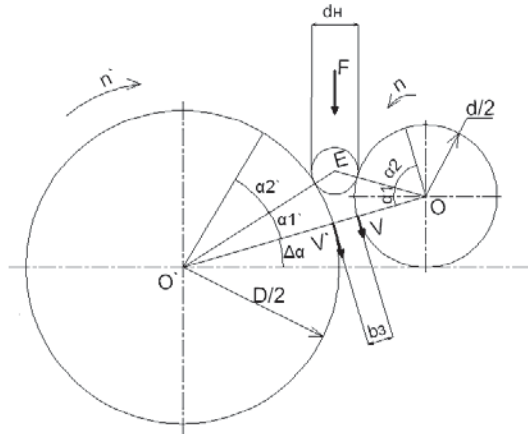
$$F_{R,O'} = \frac{EL(d_n \cos \alpha_1' - b_3)^2}{4d_n \cos \alpha_1'} \sqrt{1 + \left( \frac{D}{d_n \cos \alpha_1' - b_3} \right)^4 (\alpha_1' - \sin \alpha_1' \cos \alpha_1')^2}$$



|   |   |  |
|---|---|--|
| 1 |   | $v' > v$<br>$n \neq n'$<br>$f \neq f'$<br>$\alpha_1 \neq \alpha_1'$<br>$F_{R,O} \neq F_{R,O}'$ |
| 2 | $P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{мп.с}} + \Sigma P_{\text{д}} + P_{\text{сдв}} + P_{\text{проск}} + P_{\text{мп.н}}}{\eta}$ $P_{\text{мп.с}} = \frac{\pi}{60} \left( \frac{f((m-m')g + (F-F'))nd}{\cos(\alpha_1 + \Delta\alpha)} + \frac{f'(m'g + F')n'D}{\cos(\Delta\alpha - \alpha_1')} \right) =$ $= \frac{\pi}{60} \left( f \frac{\cos(\Delta\alpha - \alpha_1')}{\cos^2(\alpha_1 + \Delta\alpha)} (m'g + F')nd + f' \frac{1}{\cos(\Delta\alpha - \alpha_1')} (m'g + F')n'D \right)$ $\Sigma P_{\text{д}} = \frac{d}{\frac{d}{v} + \frac{F-F'}{\alpha_1(g + \frac{F-F'}{m-m'})} (f \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) + \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha))} + \frac{v-v_0}{\frac{v'}{v} + \frac{F'}{\alpha_1'(g + \frac{F'}{m})} (f' \sin(\Delta\alpha - \alpha_1') + \cos(\Delta\alpha - \alpha_1'))}} \times \frac{EL}{4} (F_{R,O}f + F_{R,O}f')$ $\Sigma P_{\text{д}} = \frac{D}{\frac{D}{v'} + \frac{F-F'}{\alpha_1'(g + \frac{F-F'}{m-m'})} (f \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) + \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha))} + \frac{v-v_0}{\frac{v'}{v} + \frac{F'}{\alpha_1'(g + \frac{F'}{m})} (f' \sin(\Delta\alpha - \alpha_1') + \cos(\Delta\alpha - \alpha_1'))}} \times \frac{EL}{4} (F_{R,O}f + F_{R,O}f')$ $P_{\text{сдв}} + P_{\text{проск}} = \frac{\pi}{60} (F_{R,O}'f'Dn' - F_{R,O}fdn)$ $P_{\text{сдв}} = \frac{\pi}{60} (F_{R,O}' \cos(\Delta\alpha - \alpha_1')f'Dn' - F_{R,O} \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha)fdn)$ $P_{\text{проск}} = \frac{\pi}{60} (F_{R,O}'f'Dn'(1 - \cos(\Delta\alpha - \alpha_1')) - F_{R,O}fdn(1 - \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha)))$ $P_{\text{мп.н}} = \frac{\pi}{30} (\sqrt{F_{X,O}^2 + G_{B,O}^2} f_{\text{мп.о}} d_{y,o} n + \sqrt{F_{X,O}'^2 + G_{B,O}'^2} f_{\text{мп.о}'} d_{y,o}' n')$ $F_{X,O} = \frac{LED^2}{4d_h \cdot \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha)} (\alpha_1 - \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha)) \quad F_{X,O}' = \frac{LED^2}{4d_h \cdot \cos(\Delta\alpha - \alpha_1')} (\alpha_1' - \sin(\Delta\alpha - \alpha_1') \cos(\Delta\alpha - \alpha_1'))$ $F_{R,O} = \frac{EL(d_h \cdot \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha) - b_3)^2}{4d_h \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha)} \sqrt{1 + \left( \frac{d}{d_h \cdot \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha) - b_3} \right)^4 (\alpha_1 - \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha))^2}$ $F_{R,O}' = \frac{EL(d_h \cdot \cos(\Delta\alpha - \alpha_1') - b_3)^2}{4d_h \cos(\Delta\alpha - \alpha_1')} \sqrt{1 + \left( \frac{D}{d_h \cdot \cos(\Delta\alpha - \alpha_1') - b_3} \right)^4 (\alpha_1' - \sin(\Delta\alpha - \alpha_1') \cos(\Delta\alpha - \alpha_1'))^2}$ |  |

Расчетные схемы

1



$$\begin{aligned} v' &> v \\ n &\neq n' \\ f &\neq f' \\ \alpha_1 &\neq \alpha_1' \\ F_{R.O} &\neq F_{R.O'} \end{aligned}$$

Расчетные формулы

2

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{mp.c} + \Sigma P_{\text{д}} + P_{\text{сдв}} + P_{\text{прск}} + P_{mp.n}}{\eta}$$

$$\begin{aligned} P_{mp.c} &= \frac{\pi}{60} \left( \frac{f((m-m')g + (F-F'))nd}{\cos(\Delta\alpha - \alpha_1)} + \frac{f'(m'g + F')n'D}{\cos(\alpha_1' + \Delta\alpha)} \right) = \\ &= \frac{\pi}{60} \left( f \frac{\cos(\alpha_1' + \Delta\alpha)}{\cos^2(\Delta\alpha - \alpha_1)} (m'g + F')nd + f' \frac{1}{\cos(\alpha_1' + \Delta\alpha)} (m'g + F')n'D \right) \end{aligned}$$

$$\Sigma P_{\text{д}} = \frac{d}{\frac{d}{v} + \frac{F-F'}{\alpha_1(g + \frac{F-F'}{m-m'})} (f \sin(\Delta\alpha - \alpha_1) + \cos(\Delta\alpha - \alpha_1))} + \frac{v - v_0}{\frac{v'}{v_0} + \frac{F'}{\alpha_1'(g + \frac{F'}{m})} (f' \sin(\alpha_1' + \Delta\alpha) + \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha))} \times (F_{R.O}f + F_{R.O'}f')$$

$$\Sigma P_{\text{д}} = \frac{D}{\frac{D}{v'} + \frac{F-F'}{\alpha_1'(g + \frac{F-F'}{m-m'})} (f \sin(\Delta\alpha - \alpha_1) + \cos(\Delta\alpha - \alpha_1))} + \frac{v - v_0}{\frac{v'}{v_0} + \frac{F'}{\alpha_1'(g + \frac{F'}{m})} (f' \sin(\alpha_1' + \Delta\alpha) + \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha))} \times (F_{R.O}f + F_{R.O'}f')$$

$$P_{\text{сдв}} + P_{\text{прск}} = \frac{\pi}{60} (F_{R.O'}f'Dn' - F_{R.O}fdn)$$

$$P_{\text{сдв}} = \frac{\pi}{60} (F_{R.O'} \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha) f'Dn' - F_{R.O} \cos(\Delta\alpha - \alpha_1) fdn)$$

$$P_{\text{прск}} = \frac{\pi}{60} (F_{R.O'}f'Dn'(1 - \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha)) - F_{R.O}fdn(1 - \cos(\Delta\alpha - \alpha_1)))$$

$$P_{mp.n} = \frac{\pi}{30} (\sqrt{F_{X.O}^2 + G_{B.O}^2} f_{np.o} d_{y.o} n + \sqrt{F_{X.O'}^2 + G_{B.O'}^2} f_{np.o'} d_{y.o'} n')$$

$$F_{X.O} = \frac{LE\dot{d}}{4d_H \cdot \cos(\Delta\alpha - \alpha_1)} (\alpha_1 - \sin(\Delta\alpha - \alpha_1) \cos(\Delta\alpha - \alpha_1)) \quad F_{X.O'} = \frac{LED^2}{4d_H \cdot \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha)} (\alpha_1' - \sin(\alpha_1' + \Delta\alpha) \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha))$$

$$F_{R.O} = \frac{EL(d_H \cdot \cos(\Delta\alpha - \alpha_1) - b_3)^2}{4d_H \cos(\Delta\alpha - \alpha_1)} \sqrt{1 + \left( \frac{d}{d_H \cdot \cos(\Delta\alpha - \alpha_1) - b_3} \right)^4 (\alpha_1 - \sin(\Delta\alpha - \alpha_1) \cos(\Delta\alpha - \alpha_1))^2}$$

$$F_{R.O'} = \frac{(d_H \cdot \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha) - b_3)^2}{d_H \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha)} \sqrt{1 + \left( \frac{D}{d_H \cdot \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha) - b_3} \right)^4 (\alpha_1' - \sin(\alpha_1' + \Delta\alpha) \cos(\alpha_1' + \Delta\alpha))^2}$$

**Выводы**

1. При измельчении зерна вальцами мощность их вращательного движения в основном затрачивается:

- на деформацию зерновки;
- сдвиг зерновки;
- трение проскальзывания образующей поверхности вальца с большей линейной скоростью о зерновку;
- трение скольжения поверхности вальцов о зерновку;
- трение в опорных подшипниках вальцов.

2. Мощность трения скольжения поверхности вальцов о зерновку зависит от их частоты вращения, диаметров вальцов, коэффициентов трения вальцов о зерновку, дополнительной внешней силы, действующей на зерновку, и угла деформации, который определяется диаметром вальцов, средней толщиной зерновки и зазором между вальцами.

3. Мощность деформации зерновки зависит также от диаметров вальцов, коэффициентов трения вальцов о зерновку, угла деформации зерновки и дополнительной внешней силы, действующей на зерновку, и кроме того, от физико-механических свойств зерновки и окружной скорости образующих поверхностей вальцов.

4. Мощность, затрачиваемая на сдвиг зерновки в межвальцовом пространстве, равна разности мощностей, создаваемых силами трения на образующих поверхностях каждого из вальцов в отдельности, вращающихся с соответствующей скоростью.

5. Для начала процесса измельчения зерна в межвальцовом пространстве необходимо, чтобы в

нем создавалась сила сдвига, достаточная для создания механического напряжения, превышающего предел прочности зерновки, а также смещение в зерновке, определяемое механическим напряжением предела прочности зерновки, модулем упругости, коэффициентом Пуассона и межвальцовым зазором.

6. Мощность трения в опорных подшипниках вальцов определяется нагрузкой на подшипники вальцов, их частотой вращения, диаметром цапф вальцов и приведенным коэффициентом трения их подшипников качения.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Шило, И.Н. К обоснованию мощности привода вальцовой плющилки/ И.Н. Шило, Н.А. Воробьев, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2008. – №3. – С. 25-28.
2. Дайнеко, В.А. Теоретическое обоснование мощности электропривода вальцовой плющилки/ В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова, Н.А. Воробьев// Агропанорама. – 2012. – №4. – С. 18-29.
3. Дайнеко, В.А. Теоретическое обоснование производительности вальцовой плющилки-измельчителя/ В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова// Агропанорама. – 2012. – №2. – С. 14-28.
4. Воробьев, Н.А. Теоретические исследования производительности вальцовой плющилки / Н.А. Воробьев//Агропанорама. – 2008. – №2. – С. 45-48.
5. Горячкин, В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 3 – 384 с.

УДК 631.371:621.31

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.12.2012

**РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМАМИ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ЗВЕЗДА-РАЗОМКНУТЫЙ ТРЕУГОЛЬНИК С НУЛЕМ» И  $Y/Y_n/СУ$  ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКЕ**

**Г.И. Янукович, канд. техн. наук, профессор, В.М. Збродыга, канд. техн. наук, доцент, Н.Г. Королевич, канд. эконом. наук, доцент (БГАТУ)**

**Аннотация**

*В статье показано, что трансформаторы со схемами соединения обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» и  $Y/Y_n/СУ$  компенсируют третью и кратные трем высшие гармоники тока и напряжения, имеющие нулевую последовательность, что улучшает форму кривой напряжения.*

*It is shown in the article that transformers with schemes of connection winding  $Y/Y_n/СУ$  and  $Y/Y_n/СУ$  compensate the third and multiple by three the highest harmonic components of current and voltage having zero chain that improves form of curved voltage.*

**Введение**

Трансформаторы со схемами соединения обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» и  $Y/Y_n/СУ$  имеют конструктивные отличия. Однако физические условия их работы одинаковы. При работе этих трансформаторов на несимметричную нагрузку проис-

ходит компенсация потоков нулевой последовательности, и напряжение с низкой стороны трансформаторов будет симметричное [1, 2]. При питании от этих трансформаторов потребителей с нелинейной нагрузкой на стороне высшего и низшего напряжения возникнет широкий спектр гармоник тока и напряжения. Токи и напряжения первой, четвертой, седьмой и так далее