

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОТВОУДАЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА РОТАЦИОННОГО ТИПА

**Ключевые слова:** нож; колебания; сила; срез; амплитуда.

Работа ротационного режущего аппарата сопровождается ударами ножей об инородные предметы, встречающиеся на поле. Для предохранения ножа от поломок он крепится к ротору шарнирно при помощи пальцев. Качество работы режущего аппарата и его долговечность в значительной степени зависят от конструкции ножа и правильного его крепления к ротору. Важно расположить ось подвеса ножа таким образом, чтобы реакция в шарнире при ударе об инородный предмет была минимальной или вовсе исключена.

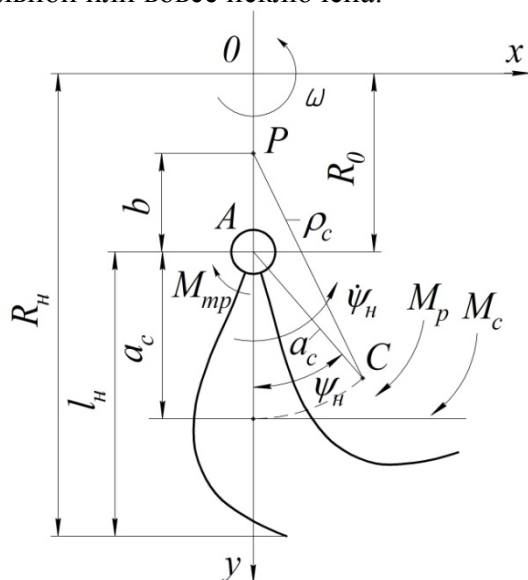


Рисунок 1

Схема для расчета шарнирно подвешенного ножа

Рассмотрим шарнирно подвешенный нож (рисунок 1). Пусть подвижная система координат  $Oxy$  жестко связана с валом ротора, причем ось  $Oy$  проходит через ось вала ротора и ось шарнира ножа. Для плоскопараллельного движения кинетическая энергия ножа определяется по формуле:

$$T = I_P(\omega + \dot{\psi}_n)^2 / 2, \quad (1)$$

где  $I_P$  – момент инерции ножа относительно оси, перпендикулярной к плоскости

движения и проходящей через мгновенный центр скоростей  $P$ ;

$\omega$  – угловая скорость вращения ротора;

$\dot{\psi}_n$  – угловая скорость вращения ножа

относительно оси подвеса  $A$ .

В (1) за положительную угловую скорость ножа  $\dot{\psi}_n$  принято направление, совпадающее с угловой скоростью вращения ротора. Соответственно положительным углом  $\psi_n$  является угол отклонения ножа от оси  $Oy$  в относительном движении в направлении положительной скорости  $\dot{\psi}_n$ .

Согласно теореме Гюйгенса [1] момент  $I_A$  инерции ножа относительно оси подвеса  $A$  определяется по формуле

$$I_A = I_C + m_n a_c^2, \quad (2)$$

где  $I_C$  – момент инерции ножа относительно оси  $C$ , проходящей через центр масс ножа;

$m_n$  – масса ножа;

$a_c$  – расстояние между осями  $A$  и  $C$ .

В соответствии с этой же теоремой

$$I_P = I_C + m_n \rho_c^2, \quad (3)$$

где  $\rho_c$  – расстояние между осями  $P$  и  $C$ .

С учетом (2) и (3) имеем

$$I_P = I_A - m_n a_c^2 + m_n \rho_c^2 = I_A + m_n (\rho_c^2 - a_c^2). \quad (4)$$

Так как ротор вращается относительно оси  $O$ , а нож вращается (качается) относительно оси  $A$ , причём обе эти оси параллельны, то результирующее движение ножа будет мгновенным вращением с абсолютной угловой скоростью  $\omega + \dot{\psi}_n$  вокруг мгновенной оси, параллельной данным, причём положение этой оси определяется расстоянием [1]

$$b = R_0 \omega / (\omega + \dot{\psi}_n), \quad (5)$$

где  $R_0$  – радиус расположения оси шарнира.

Из геометрических построений рисунка 1 вытекает:

$$\rho_c^2 = (b + a_c \cos \psi_n)^2 + a_c^2 \sin^2 \psi_n = b^2 + 2a_c b \cos \psi_n + a_c^2,$$

где  $\psi_n$  – угол отклонения центра масс ножа от положения равновесия.

Тогда с учетом этого выражения, а также (4) и (5) получим:

$$I_P = I_A + m_n [R_0^2 \omega^2 / (\omega + \dot{\psi}_n) + 2a_c R_0 \omega \cos \psi_n] / (\omega + \dot{\psi}_n).$$

Подставляя данное выражение вместо  $I_P$  в (1) определяется кинетическая энергия ножа:

$$T = [I_A (\omega + \dot{\psi}_n)^2 + m_n (R_0^2 \omega^2 + 2a_c R_0 \omega (\omega + \dot{\psi}_n) \cos \psi_n)] / 2. \quad (6)$$

Вспользуемся уравнением Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_n} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi_n} = Q, \quad (7)$$

где  $Q$  – обобщенная сила.

Из (6) определяются частные производные:

$$\frac{\partial T}{\partial \psi_n} = -m_n a_c R_0 \omega (\omega + \dot{\psi}_n) \sin \psi_n;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_n} = I_A (\omega + \dot{\psi}_n) + m_n a_c R_0 \omega \cos \psi_n$$

и при постоянной угловой скорости  $\omega = const$  производная по времени  $t$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_n} \right) = I_A \ddot{\psi}_n - m_n a_c R_0 \omega \sin \psi_n \cdot \dot{\psi}_n.$$

$$v_n = \rho_n (\omega + \dot{\psi}_n) = \sqrt{R_0^2 \omega^2 + 2l_n R_0 \omega (\omega + \dot{\psi}_n) \cos \psi_n + l_n^2 (\omega + \dot{\psi}_n)^2}. \quad (9)$$

В случае удара ножа об инородный предмет послеударная скорость точки на

лезвии ножа при неизменном угле  $\psi_n$  определяется по формуле:

$$v_{n1} = \sqrt{R_0^2 \omega^2 + 2l_n R_0 \omega (\omega + \dot{\psi}_{n1}) \cos \psi_n + l_n^2 (\omega + \dot{\psi}_{n1})^2}. \quad (10)$$

Если положить удар ножа об инородный предмет абсолютно упругим, т.е.  $v_{n1} = -v_n$ , то в соответствии с (9) и (10) определяется послеударная относительная угловая скорость ножа:

$$\dot{\psi}_{n1} = -\dot{\psi}_n - 2\omega (R_0 \cos \psi_n + l_n) / l_n. \quad (11)$$

После подстановки в данное уравнение вместо  $\dot{\psi}_n + \dot{\psi}_{n1}$  выражения, вытекающего из (11), определяется условие:

$$I_A = m_n a_c l_n = m_n a_c (R_n - R_0), \quad (12)$$

которое обеспечивает отсутствие реакции в шарнире ножа при его ударе об инородный предмет. Заметим, что условие (12) не осуществимо для ножа, выполненного из

После подстановки этих производных в (7) и несложных преобразований получим дифференциальное уравнение колебаний ножа

$$I_A \ddot{\psi}_n + m_n a_c R_0 \omega^2 \sin \psi_n = Q. \quad (8)$$

Абсолютная скорость центра масс  $C$  ножа определяется по формуле:

$$v_c = \rho_c (\omega + \dot{\psi}_n) = \sqrt{R_0^2 \omega^2 + 2a_c R_0 \omega (\omega + \dot{\psi}_n) \cos \psi_n + a_c^2 (\omega + \dot{\psi}_n)^2}.$$

Скорость точки на лезвии ножа определяется, если в последнем уравнении заменить  $a_c$  на длину ножа  $l_n = R_n - R_0$ :

Определим условие, при котором кинетическая энергия ножа до и после удара об инородный предмет остается неизменной, т.е.  $T = T_1$ . В соответствии с этим при неизменном угле  $\psi_n$  справедливо равенство:

сплошной полосы прямоугольной формы. Поэтому для обеспечения этого условия требуется специальная конструкция ножа с определенными геометрическими параметрами.

Рассмотрим относительное движение шарнирно подвешенного ножа, представляющее собой колебательное движение, вызванное начальным его отклонением от

положения равновесия. Отклонение ножа может происходить под действием удара со стороны инородного предмета, а также приложенной к лезвию ножа силы резания.

$$Q = -(M_c \delta\psi_n + M_{mp} \delta\psi_n + M_p \delta\psi_n) / \delta\psi_n = -M_c - M_{mp} - M_p, \quad (13)$$

где  $M_c$ ,  $M_{mp}$ ,  $M_p$  – моменты сил соответственно сопротивления воздуха, трения в шарнире и резания. Момент силы трения определяется по формуле:

$$M_{mp} = m_n \omega^2 f r_{ш} (R_0 \cos \psi_n + a_c) \text{sign} \dot{\psi}_n, \quad (14)$$

где  $f$  – коэффициент трения в шарнире ножа;

$r_{ш}$  – радиус шарнира.

Заметим, что момент сил сопротивления воздуха  $M_c$  действует на нож постоянно и в общем случае в течение каждого оборота

$$\ddot{\psi}_n = -m_n \omega^2 [a_c R_0 \sin \psi_n + f r_{ш} (R_0 \cos \psi_n + a_c) \text{sign} \dot{\psi}_n] / I_A - (M_c + M_p) / I_A. \quad (15)$$

При резании ботвы углы  $\psi_n$  малы, поэтому оправдано положить  $\sin \psi_n \approx \psi_n$ ;  $\cos \psi_n \approx 1$ , тогда (15) преобразуется к виду:

$$\ddot{\psi}_n + k_1^2 \psi_n + k_2 = 0, \quad (16)$$

где введены обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \psi_n &= \left[ -k_2 + (k_1^2 \psi_{n0} + k_2) \cos k_1 t + k_1 \dot{\psi}_{n0} \sin k_1 t \right] / k_1^2; \\ \dot{\psi}_n &= \dot{\psi}_{n0} \cos k_1 t - (k_1 \psi_{n0} + k_2 / k_1) \sin k_1 t. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

В соответствии с (17) нож совершает равномерно-затухающие колебания при  $0 \leq t \leq k_1^{-1} \arctg [k_1 \dot{\psi}_{n0} / (k_2 + k_1^2 \psi_{n0})] \leq \pi / k_1$ , то есть при соблюдении условия  $\text{sign} \dot{\psi}_n = \text{sign} \dot{\psi}_{n0}$ . Полагая во втором уравнении системы (17) для полупериода  $\dot{\psi}_n = \dot{\psi}_{n0} = 0$ , определяются:  $\sin(k_1 \tau_0 / 2) = 0$ ;  $\tau_0 = 2\pi / k_1$ , (18) причем период  $\tau_0$  колебаний ножа не зависит от того, действует ли на нож момент  $M_c$  сопротивления воздуха или нет. При  $\dot{\psi}_{n0} = 0$  за время  $\tau_0 / 2$  угол  $\psi_n$  изменяется

$$\left[ -M_c / (m_n \omega^2) - (R_0 + a_c) r_{ш} f \right] \leq \psi_n R_0 a_c \leq \left[ -M_c / (m_n \omega^2) + (R_0 + a_c) r_{ш} f \right]. \quad (20)$$

Основываясь на решениях дифференциального уравнения (16) для малых колебаний ножа и учитывая, что направление ско-

Вычислим входящую в (8) обобщенную силу  $Q$ , которая выражается из элементарной работы по обобщенной координате  $\psi_n$ :

ротора является величиной переменной. Момент силы резания является функцией угла поворота ротора и действует на нож при резании примерно на угле  $\pi/2$  поворота ротора. Причем этот момент также является величиной переменной и определяется распределением массы ботвы в зависимости от угла поворота ротора, и носит вероятностную природу действия.

С учетом (13) и (14) уравнение (8) преобразуется к виду:

$$k_1^2 = m_n \omega^2 R_0 a_c / I_A;$$

$$k_2 = [m_n \omega^2 (R_0 + a_c) r_{ш} f \cdot \text{sign} \dot{\psi}_n + M_c + M_p] / I_A.$$

Решениями дифференциального уравнения (16) являются:

от  $\psi_{n0}$  до  $\psi_{n1} = -\psi_{n0} - 2k_2 / k_1^2$ . По окончании действия момента резания за время одного периода  $\tau_0$  колебаний ножа углы отклонения его в крайних положениях уменьшаются по абсолютной величине на угол  $|\psi_{n0} - \psi_{n2}|$  в соответствии с уравнением:

$$|\psi_{n0} - \psi_{n2}| = 4(R_0 + a_c) r_{ш} f / (R_0 a_c), \quad (19)$$

причем всегда колебания ножа прекращаются в одном из крайних положений, когда угловая скорость  $\dot{\psi}_n = 0$  и выполняются условия:

рости ножа изменяется через каждые  $\pi / k_1$  секунд, справедлива система уравнений:

$$\left.
\begin{aligned}
k_1 &= \omega \sqrt{m_n R_0 a_c / I_A}; \quad k_2 = (m_n \omega^2 (R_0 + a_c) r_{uf} \cdot \text{sign } \dot{\psi}_{n0} + M_c) / I_A; \\
t_0 &= \frac{1}{k_1} \arctg \frac{k_1 \dot{\psi}_{n0}}{k_2 + k_1^2 \psi_{n0}}; \quad n_0 = \text{sign} [\text{sign} (t - t_0) + 1], \quad n_0 = 0, 1; \\
n_1 &= \text{int} \left[ \frac{k_1}{2\pi} (t - t_0) \right] \cdot n_0, \quad n_1 = 0, 1, 2, \dots; \\
n_2 &= \text{int} \left[ \frac{k_1}{\pi} (t - t_0) - 2n_1 \right] \cdot n_0, \quad n_2 = 0, 1; \\
k_2^* &= -(m_n \omega^2 (R_0 + a_c) r_{uf} \cdot \text{sign } \dot{\psi}_{n0} - M_c) / I_A; \\
\psi_{n1} &= \left\{ \left[ -\frac{k_2}{k_1^2} + \text{sign } \dot{\psi}_{n0} \frac{1}{k_1^2} \sqrt{k_1^2 \dot{\psi}_{n0}^2 + (k_2 + k_1^2 \psi_{n0})^2} \right] \cdot n_0 + \right. \\
&\quad \left. + \psi_{n0} (1 - n_0) - \frac{4(R_0 + a_c) r_{uf}}{R_0 a_c} \text{sign } \dot{\psi}_{n0} \cdot n_1 \right\} (1 - 2n_2) - 2n_2 \frac{k_2^*}{k_1^2}; \\
\dot{\psi}_{n1} &= \dot{\psi}_{n0} (1 - n_0); \quad t_1 = t - t_0 n_0 - \frac{2\pi}{k_1} n_1 - \frac{\pi}{k_1} n_2; \\
k_2^{**} &= -(m_n \omega^2 (R_0 + a_c) r_{uf} \cdot \text{sign } \dot{\psi}_{n0} (-1)^{1+n_0+n_2} - M_c) / I_A; \\
\psi_n &= \left[ -k_2^{**} + (k_1^2 \psi_{n1} + k_2^{**}) \cos k_1 t_1 + k_1 \dot{\psi}_{n1} \sin k_1 t_1 \right] / k_1^2; \\
\dot{\psi}_n &= \dot{\psi}_{n1} \cos k_1 t_1 - (k_1 \psi_{n1} + k_2^{**} / k_1) \sin k_1 t_1,
\end{aligned}
\right\} (21)$$

в которой следует принимать в качестве  $\dot{\psi}_{n0}$  любое число, отличное от нуля. Если  $\dot{\psi}_{n0} = 0$ , то следует задаться для  $\dot{\psi}_{n0}$  любым рациональным малым числом.

На рисунках 2-5 представлены графики колебаний ножа, полученные решением (21) при следующих исходных данных:  $m_n = 1,5$  кг,  $R_0 = 0,125$  м;  $R_n = 0,315$  м;  $r_{uf} = 0,075$  м;  $a_c = 0,14$  м;  $f = 0,15$  и моменте инерции ножа, удовлетворяющего условию (12).

При определенных условиях можно рассматривать шарнирные связи режущих элементов с ротором как жесткие [2]. Чтобы вывести нож из состояния равновесия в

относительном движении, нарушив жесткость связи его с ротором, к нему необходимо приложить внешнюю силу, которая преодолет силу трения в шарнире. Как уже отмечалось, нож в установившемся движении ротора занимает одно из положений, удовлетворяющее условию (20). Причем при многократном выведении ножа из положения равновесия он стремится к наиболее устойчивому положению, соответствующему углу:

$$\psi_n = -[M_c / (m_n \omega^2) + (R_0 + a_c) r_{uf}] / R_0 a_c. \quad (22)$$

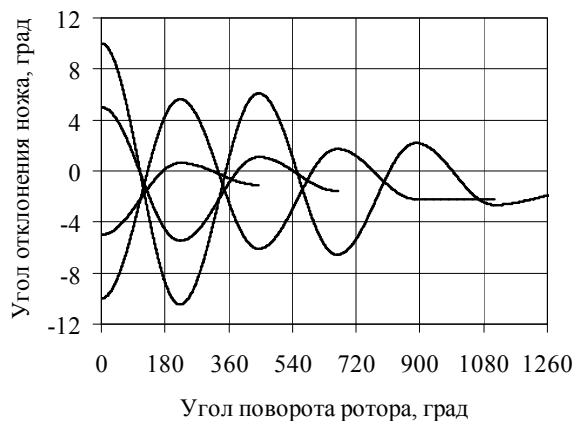


Рисунок 2  
Графики колебаний ножа с учетом сопротивления воздуха и без учета момента на срез ботвы

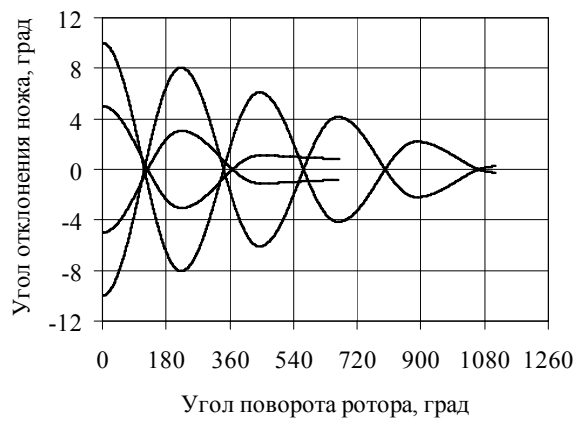


Рисунок 3  
Графики колебаний ножа без учета сопротивления воздуха и момента на срез ботвы

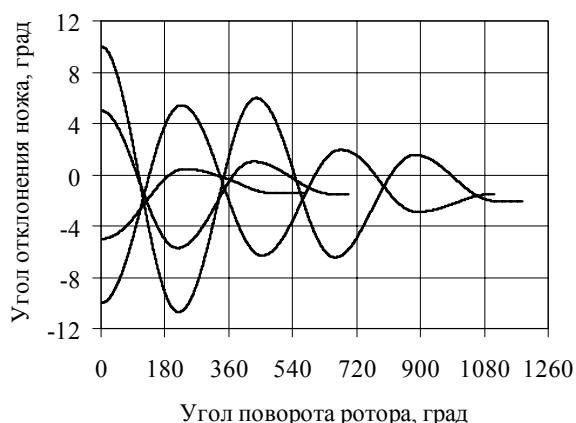


Рисунок 4

Графики колебаний ножа с учетом сопротивления воздуха и момента на срез ботвы

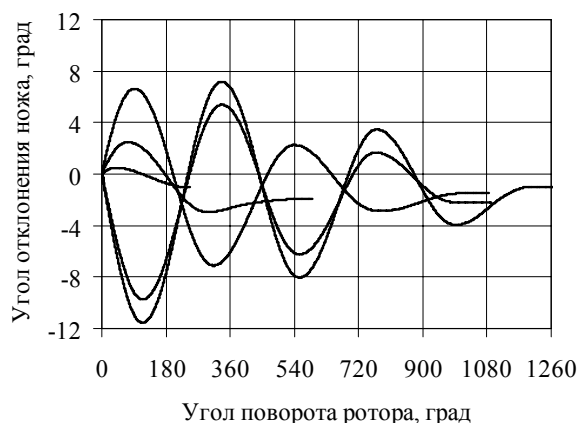


Рисунок 5

Графики колебаний ножа с учетом сопротивления воздуха и момента на срез ботвы при начальном угле 0 град. и угловых скоростях: -12; -10; 2; 5; 10 рад/с

Для поворота ножа в шарнире в сторону, обратную его движению, ему необходимо преодолеть момент силы трения в шарнире и момент от действия центробежной силы, возникающей в результате отклонения ножа от положения равновесия на угол  $\psi_n$ . Момент  $M_p$ , способный вывести нож из положения равновесия, определяется из (16) если в нем положить  $\ddot{\psi}_n = 0$ , а угол  $\psi_n$  подставить из (22). Тогда после несложных преобразований

$$M_p = P_p(R_n - R_0) > 2m_n\omega^2(R_0 + a_c)r_{uf}, \quad (23)$$

где  $P_p$  – сила резания, которая имеет вероятностную природу действия и изменяется в процессе среза не только одного оборота, но и от оборота к обороту ротора. Наиболее концентрированный срез достигается при резании головок высокорас-

ложенных корнеплодов, при этом в зависимости от их диаметра  $P_p$  достигает 50-100 Н. В случае выполнения (23) нож приобретает относительную скорость, заставляющую его поворачиваться в сторону, противоположную направлению вращения ротора. В результате этого скорость резания снижается, усилие резания возрастает, ухудшается качество бесподпорного среза, сопровождающегося сколом головки корнеплода.

Исследуем процесс среза головки корнеплода. Для этого в соответствии с (6) при  $\dot{\psi}_n = 0$  и  $\psi_n \approx 0$  определим кинетическую энергию ножа до среза:

$$T_1 = \omega^2 [I_A + m_n R_0 (R_0 + 2a_c)] / 2 \quad (24)$$

и в конце среза:

$$T_2 = \left\{ I_A (\omega + \dot{\psi}_n)^2 + m_n [R_0^2 \omega^2 + 2a_c R_0 \omega (\omega + \dot{\psi}_n)] \right\} / 2. \quad (25)$$

Тогда работа резания:

$$A_p = T_1 - T_2 = -\dot{\psi}_n [I_A (\dot{\psi}_n + 2\omega) / 2 + m_n a_c R_0 \omega]. \quad (26)$$

В соответствии с (9) скорость ножа в конце среза равна:

$$v_{n \min} = R_n \omega + (R_n - R_0) \dot{\psi}_n. \quad (27)$$

Ограничив скорость, при которой обеспечивается качественный бесподпорный срез, критической скоростью  $v_{n \min}$ , определяется:

$$\dot{\psi}_n = (v_{n \min} - v_n) / (R_n - R_0), \quad (28)$$

где  $v_n = R_n \omega$  – окружная скорость ротора.

При выполнении условия (12) с учетом (26) и (28) работа резания

$$A_p = m_n a_c (v_n - v_{n \min})^2 / [2(R_n - R_0)]. \quad (29)$$

С другой стороны она же равна:

$$A_p = A_{y0} S,$$

где  $A_{y0}$  – удельная работа резания;  $S$  – площадь среза.

При известной максимальной работе резания из (29) определяется необходимая масса ножа:

$$m_{n \min} = 2A_p(R_n - R_0) / [a_c(v_n - v_{n \min})^2]. \quad (30)$$

С учетом (12) определяется минимальный момент инерции ножа:

$$I_{n \min} = 2A_p [(R_n - R_0) / (v_n - v_{n \min})]^2. \quad (31)$$

В результате удара ножа об инородный предмет ножу сообщается относительная угловая скорость, которая принимает достаточно высокое значение и приводит к колебаниям ножа с большой амплитудой. Определим период  $\tau$  колебания ножа при большой амплитуде отклонения ножа. Для этого, пренебрегая в (15) величинами малого порядка, представим закон движения ножа в виде собственных колебаний:

$$K(k) = \frac{\pi}{2} F\left(\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; 1; k^2\right) = \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 k^6 + \dots \right], \quad (36)$$

где  $F(a; b; c; d)$  – гипергеометрическая функция.

Этот ряд сходится абсолютно и равномерно при  $|k| < 1$ , но при  $k$  близком единице сходится медленно. Если преобразовать модуль  $k$  как  $k' = \sqrt{1 - k^2}$  то интеграл Лежандра вычисляется по формуле [3]:

$$K(k) = \frac{\pi}{2} \prod_{i=0}^{n=\infty} \frac{2}{1 + k'_i}, \quad (37)$$

где  $k'_0 = k'$ ;  $k'_{i+1} = 2\sqrt{k'_i / (1 + k')}$ ;  $i = 0, 1, 2, \dots$

$$\tau = \frac{2\pi}{k_1} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k^4 + \dots + \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{2 \cdot 4 \dots 2n} k^n \right] = \tau_0 \xi$$

или исходя из (37):

$$\tau = \tau_0 \prod_{i=0}^{n=\infty} [2 / (1 + k'_i)] = \tau_0 \xi. \quad (38)$$

Таблица 1 Значения множителя  $\xi$  в зависимости от амплитуды  $A$

$A$ , град	50	60	70	80	90	100	110	120
$\xi$	1,050	1,073	1,102	1,137	1,180	1,232	1,295	1,373

Заметим, что при сообщении ножу большой послеударной скорости ему пре-

$$\ddot{\psi}_n + k_1^2 \sin \psi_n = 0, \quad (32)$$

где в качестве  $k_1$  выступает то же выражение, что и в случае малых колебаний.

Из (32) определяется период колебаний ножа:

$$\tau = \frac{4}{k_1} \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \sin^2 x)^{-1/2} dx, \quad (33)$$

где  $k = \sin(A/2)$ ;  $A = |\psi_{n0}|$  – амплитуда колебаний. Интеграл

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \sin^2 x)^{-1/2} dx \quad (35)$$

представляет собой полный нормальный эллиптический интеграл Лежандра первого рода. Для всех действительных значений  $k^2 < 1$  справедливо [3]:

Эта формула позволяет вычислить  $K(k)$  достаточно точно уже при  $n = 3$ .

Таким образом, с учетом (36) и (37) период колебаний ножа при больших значениях амплитуды  $A$  вычисляется по формуле:

$$\tau = \frac{4}{k} K\left(\sin \frac{A}{2}\right).$$

С учетом (18) и (36) представим период  $\tau$  колебаний в виде:

Расчеты показывают, что в зависимости от  $A$  множитель  $\xi$  принимает значения в соответствии с таблицей 1.

пятствует вращаться вокруг оси шарнира вал ротора. Поэтому при большом ударном

импульсе нож отклоняется на конечный угол  $\psi_{нОmax} = (-100 \dots -120)$  град. и, ударяясь о вал ротора, приходит в колебательное движение с большой амплитудой, но не превышающей  $|\psi_{нОmax}|$ .

В процессе работы нож режущего аппарата может ударяться об один и тот же инородный предмет неоднократно. Если при первом ударе ножа его угловая скорость  $\omega_{нО}$  отсутствует, то при повторном ударе ножа, выведенного предшествующим ударом из положения равновесия и совершающего колебательные движения относительно оси шарнира,  $\omega_n$  может отличаться от нуля.

Подберем конструктивные параметры ножа таким образом, чтобы ударный импульс не приводил к поломке ножа. Для этого необходимо иметь в момент повторного удара об инородный предмет направление относительной угловой скорости ножа  $\omega_n$ , противоположное  $\omega$ , или такое положение ножа, которое бы исключало повторный удар.

Повторный удар ножа об инородный предмет возможен на углу  $2\pi$  поворота ротора. Для исключения повторного удара необходимо, чтобы нож занимал к моменту возможной встречи с препятствием одно из крайних положений. Но это условие может быть выполнено только для одного оборота ротора. Например, за первый оборот нож

совершил колебания, соответствующие 0,75 периода колебаний, и занимает переднее крайнее положение. Но за второй оборот ротор совершит уже 1,5 периода колебаний, что соответствует в относительном движении нижнему положению ножа и максимальной угловой скорости, совпадающей с угловой скоростью вращения ротора. То есть, если после удара об инородный предмет и первого оборота ротора ножи увернутся от последующего удара, то после совершения ротором второго оборота они неизбежно ударятся об тот же предмет (если конечно ротор не успеет его переехать, что зависит от размеров этого предмета и поступательной скорости агрегата) с гораздо большей скоростью, чем при первом ударе, и могут разрушиться.

Принимая период колебаний ножа времени одного или нескольких оборотов ротора, все последующие удары об тот же предмет если и будут происходить, то с минимальной абсолютной скоростью ножа, что не приведет к его поломке. Однако при выполнении этого условия совпадают частоты колебаний ножа и вращения ротора. Это в свою очередь приводит к увеличению амплитуды колебаний ножей при срезе растительной массы. Поэтому для обеспечения работоспособности ножей и исключения резонанса это условие также неприемлемо [4]. Компромиссным условием является:

$$\lambda \tau / 3 = (2\pi / \omega) \cdot [\omega R_n / (\omega R_n + v_n)]; \quad \lambda = 1, 2, 4, 5 \dots, \quad (39)$$

где  $v_n$  – поступательная скорость агрегата. Множитель  $\omega R_n / (\omega R_n + v_n)$  при окружной скорости ротора 25 м/с и поступательной скорости 1,5 м/с равен 0,9434.

Численным решением (15) методом Рунге-Кутта (рисунок 6) установлено, что при повторной встрече с инородным предметом условие (39) за первые два оборота ротора обеспечивает отклонение ножа на угол  $\psi_n \approx \pm 0,85$   $\psi_{нОmax} = \pm(85-102)^\circ$ . Это практически исключает повторные удары об этот же предмет, а если это столкновение неизбежно из-за его больших размеров (длины и высоты), то скорость удара, хотя и будет больше окружной скорости ротора, но не является критической для разрушения

ножа. Зато после переезда ротором инородного предмета сложение переносной угловой скорости с относительной скоростью ножа в момент среза ботвы обеспечивает быстрое затухание его колебаний. После совершения ротором третьего оборота нож имеет к моменту возможного удара относительную скорость, направленную в противоположную сторону переносной скорости, т.е. как непосредственно после удара. Это практически исключает возможное столкновение ножа с тем же предметом.

Определим конструктивные параметры ротора, при которых обеспечивается условие (39). Принимая согласно таблице 1 для амплитуды колебания ножа  $(100-120)^\circ$  пе-

риод колебаний  $\tau = (1,232 - 1,373)\tau_0$  и значение параметра  $\lambda = 2$ , с учетом (18) получим:

$$\sqrt{m_n R_0 a_c / I_A} = (0,772 - 0,860);$$

$$I_A = (1,352 \dots 1,678) m_n R_0 a_c. \quad (40)$$

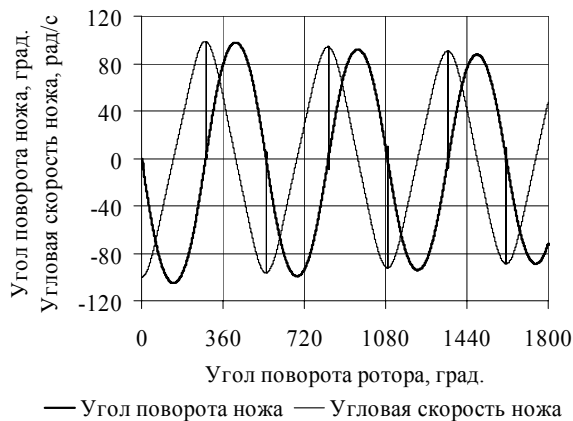


Рисунок 6

График колебаний ножа с большой амплитудой

Приравнивая правые части уравнений (12) и (40), определяем

$$R_0 = (0,373 \dots 0,425) R_n \approx 0,399 R_n; \quad (41)$$

$$R_n = (1,595 \dots 1,739) (R_n - R_0) \approx 1,667 (R_n - R_0). \quad (42)$$

Для выполнения как основной функции – среза и швыряния растительной массы, так и функции отклонения ножа при наезде на инородные предметы необходима длина ножа 0,18–0,2 м. Тогда из (41) и (42) определяются  $R_0 = (0,107 - 0,148)$  м и  $R_n = (0,287 - 0,348)$  м. Принимая  $R_n = 315$  мм получим  $R_0 = 125$  мм.

Зависимости (12), (41) и (42) позволяют определить такие конструктивные параметры ножа, которые практически исключают реакцию в шарнире при ударе ножа об инородный предмет, повторные удары ножа об тот же предмет и обеспечивают быстрое затухание колебаний ножа. Формулы (30) и (31) позволяют найти минимальные массу и момент инерции ножа, обеспечивающие качественный срез ботвы и головок корнеплодов. Режущие элементы должны быть выполнены из составных ножей, к держателям которых прикреплены нитевидные билы, что позволит обеспечить не только условие (12), но и замену режущей части при её износе или поломке, а также доочистку головок корнеплодов от остатков ботвы [5].

### Библиографический список

1. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1964. – 478 с.
2. Резник Н.Е. Кормоуборочные комбайны. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1973. – 832 с.
4. Босой Е.С. Режущие аппараты уборочных машин. – М.: Машиностроение, 1967. – 167 с.
5. Пат. 2338364 Российская Федерация. Ботвоудаляющее устройство / Мартынов В.М., Юхин Г.П., Калимуллин А.М., Катков А.А.; заявитель и патентообладатель Башкирский ГАУ. – № 2007109381/12; заявл.14.03.07; опубл. 20.11.08, Бюл. № 32. – 5 с.

### Сведения об авторе

**Мартынов Владимир Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования животноводческих и перерабатывающих предприятий ФГОУ ВПО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34. E-mail: m\_w\_m@mail.ru.

Рассмотрено колебательное движение ножа вокруг шарнира. Исходя из условий отсутствия реакции в шарнире, невозможности повторной встречи ножа с инород-

ным предметом и быстрого затухания колебаний ножа определены основные конструктивные параметры ротора ботвоудаляющего устройства.



V. Martynov

## RATIONALE FOR THE PARAMETERS OF THE BEET TOPS CLEANING DEVICE OF ROTARY TYPE

*Key words: knife, vibration, force, section, the amplitude.*

### *Authors' personal details*

*Martynov Vladimir*, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor at the Chair of Livestock-breeding and Processing Equipment, Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education Bashkir State Agrarian University, Ufa, 50-letiya Otyabrya str., 34. E-mail: m\_w\_m@mail.ru.

The article describes the oscillatory motion of the knife around the hinge. It reveals basic design characteristics of a plant-top remover's

rotor while there is no response in the hinge, the knife is incapable to meet a foreign object and knife's vibration dampens quickly.

© Мартынов В.М.

УДК 631. 172

М.Л. Хабибуллин, Р.С. Аипов, М.И. Тухватуллин

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

*Ключевые слова: электромагнитное поле сверхвысокой частоты; энергия; объемный равномерный нагрев; рабочая камера; источник СВЧ-энергии.*

Сушка диэлектрических материалов энергией электромагнитного поля сверхвысокой частоты (СВЧ) является перспективным способом, так как не требует прогрева окружающего воздуха (теплоносителя) и структуры материала.

При СВЧ-сушке происходит активное обезвоживание древесины в результате воздействия электромагнитного излучения на свободную и связанную влагу. Это явление и обуславливает в несколько раз более эффективную сушку древесины и значительно сокращает расход энергии, потому что большая часть энергии поглощается непосредственно влагой внутри древесины. Выделяемая теплота расходуется на нагрев сырой древесины до температуры кипения воды и на испарение влаги. Так как влага внутри древесины находится в замкнутом пространстве, с началом кипения воды внутри древесины повышается избыточное

давление, что приводит к переносу влаги от внутренних слоев материала к его поверхности [1].

Основная доля СВЧ-энергии поглощается именно водой, состоящей из дипольных молекул, тогда как сама древесина, состоящая из весьма сложного комплекса органических молекул, поглощает лишь незначительную часть энергии волны. Таким образом, нагрев в этом случае является объемным и относительно равномерным – это основная особенность и достоинство СВЧ-нагрева [2].

При сушке обычными методами нагрев материала осуществляется постепенно, начиная с его внешних слоев благодаря явлению теплопроводности. При этом нагрев внутренних слоев материала до температуры интенсивного парообразования, по сравнению с СВЧ-нагревом, из-за низкой теплопроводности древесины требует го-