

Гурнович Н.П., к.т.н., доцент, Ходасевич В.И., к.т.н., доцент,

Портяко Г.Н., к.т.н., доцент, Гурнович М.Н., инженер

УО Белорусский государственный аграрный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

Кормоуборочный агрегат представляет собой систему с распределенными параметрами, имеющую бесконечное число степеней свободы. Динамическая модель, эквивалентная агрегату, представляет собой систему, составленную из абсолютно жестких масс, соединенных безинерционными податливостями и сцеплениями, динамика которой мало чем отличается от динамики реального агрегата. При составлении динамической модели вращающейся массы учитываются соответствующими моментами инерции и податливости всех элементов сводятся в упругие звенья. Вся динамическая модель агрегата в нашем случае состоит из динамической модели трактора МТЗ 1221 «Беларус» и динамической модели прицепного кормоуборочного комбайна КДП-3000 с платформенной жаткой для уборки высокостебельных культур. Динамическая модель кормоуборочного комбайна с жаткой для уборки высокостебельных культур представлена в виде сорока масс и она нуждается в упрощении. Приведение моментов инерции и податливостей, выполняем из условия сохранения кинетической и потенциальной энергии исходной и приведенной систем к ведущему валу привода режущего аппарата. Это условие оказывается выполненным, если расчет произвести по формулам [1]:

$$I_{пр} = \frac{I}{i^2}; \quad e_{пр} = e \cdot i^2, \quad (1)$$

где i – передаточное отношение от приводного вала к валу приведения; $I_{пр}$, $e_{пр}$ – соответственно величины момента инерции и податливости после приведения; e – соответственно величины момента инерции и податливости до приведения.

В результате этих операций получена динамическая модель агрегата в виде системы масс со сосредоточенными параметрами. Упрощение исходной динамической системы модели агрегата проведено с использованием метода Е.И.Ривина. В результате проведенных упрощений получена динамическая система, состоящая из семи масс, представлена на рисунке 1.

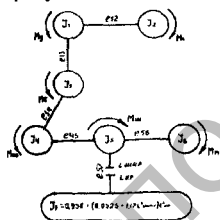


Рисунок 1 – Приведенная динамическая модель агрегата.

В данной динамической системе активными движущими силами является движущий момент, передаваемый от двигателя на рабочие органы.

Кроме приводного момента в агрегате действуют и моменты сопротивления:

M_c – момент сопротивления от перекатывания всех поступательно движущихся масс агрегата;

$$M_c = f \cdot G, \quad (2)$$

где f – коэффициент сопротивления перекатыванию агрегата; G – вес агрегата.

M_b – момент сопротивления, возникающий в измельчающем аппарате. Численное значение этого момента определялось из осциллограммы.

$$M_b = M_{b1} + \Delta M_b, \quad (3)$$

где ΔM_b – неравномерность загрузки измельчающего аппарата, возникающая от условий работы, урожайности и других объективных факторов. M_b – момент сопротивления, возникающий в питательном аппарате, $M_a = M_{a1} + \Delta M_a$. M_s – определялся из осциллограммы. $M_{ш}$ – момент сопротивления шнека, $M_{ш} = M_{ш1} + \Delta M_{ш}$. $M_{мот}$ – момент сопротивления мотвила, $M_{мот} = M_{мот1} + \Delta M_{мот}$.

В таблице представлены значения приведенных к ведущему валу привода режущего аппарата моментов инерции масс и приведенных податливостей.

Таблица – Значения приведенных к ведущему валу привода режущего аппарата моментов инерции и податливостей

Моменты инерции, Нм ²	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
	613,0	441,0	511,1	24,0	1,55	0,122
Податливость, 1/Нм	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6
10^{-5}	1,31	1,07	2,38	4,65	69,5	9,56

Полученная семимассовая система описывается системой из семи уравнений Лагранжа II рода. Уравнения Лагранжа второго рода для системы с n степенями свободы имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{\varphi}_n} \right) - \frac{dT}{d\varphi_n} (T-U) = G_n, \quad (4)$$

где $n=1, 2, 3$ – число степеней свободы, в нашем случае $n=7$. φ_n – угол поворота масс; G_n – обобщенные силы; T – кинетическая энергия динамической системы; U – потенциальная энергия динамической системы.

Кинетическая энергия T и потенциальная U динамической системы определяется по выражениям:

$$T = \frac{I_1 \cdot (\dot{\varphi}_1)^2}{2} + \frac{I_2 \cdot (\dot{\varphi}_2)^2}{2} + \dots + \frac{I_n \cdot (\dot{\varphi}_n)^2}{2}; \quad U = \frac{c_1(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} + \frac{c_2(\varphi_2 - \varphi_3)^2}{2} + \dots + \frac{c_{n-1}(\varphi_{n-1} - \varphi_n)^2}{2} \quad (5)$$

Подставляя значение кинетической и потенциальной энергии в уравнения Лагранжа II рода, получим систему уравнений:

$$I_1 \ddot{\varphi}_1 = M_{дв} - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - c_{13}(\varphi_1 - \varphi_2) - k_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - k_{13}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3);$$

$$I_2 \ddot{\varphi}_2 = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + k_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - M_c;$$

$$I_3 \ddot{\varphi}_3 = c_{13}(\varphi_1 - \varphi_3) + k_{13}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3) - c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) - k_{34}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - M_6;$$

$$I_4 \ddot{\varphi}_4 = c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + k_{34}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - c_{45}(\varphi_4 - \varphi_5) - k_{45}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5) - M_e;$$

$$I_5 \ddot{\varphi}_5 = c_{45}(\varphi_4 - \varphi_5) + k_{45}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5) - c_{56}(\varphi_5 - \varphi_6) - k_{56}(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6) - c_{57}(\varphi_5 - \varphi_7) - k_{57}(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_7) - M_{ш};$$

$$I_6 \ddot{\varphi}_6 = c_{56}(\varphi_5 - \varphi_6) - k_{56}(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6) - M_{мом};$$

$$\left[I_7 + (I_7' + I_7'' \frac{A^2 \cos^2 \gamma}{B^2}) \right] \ddot{\varphi} - \left\{ \left(I_7' + I_7'' \frac{A^2 \cos^2 \gamma}{B^2} \right) \frac{I_7^2 \delta \sin 2\varphi_7 (1 + \sin^2 \delta \cos^2 \varphi_7)}{\cos^2 \delta (1 + I_7^2 \delta^2 \sin^2 \varphi_7)} + I_7' \frac{A \sin(\varphi - \psi) \cos^2 \gamma}{B^2} \times \right. \\ \left. \times \left(I_7 \gamma \sin \mu + \frac{2AC}{B} \right) \cdot \left(\frac{I_7 \delta \cos \varphi_7}{1 + I_7^2 \delta^2 \sin^2 \varphi_7} \right) \right\} \dot{\varphi} = c_{57}(\varphi_5 - \varphi_7) - k_{57}(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_7) - M_n \frac{A \cos \gamma}{B} \quad (6)$$

$$\text{где } A = 1 + \cos(\varphi + \psi) I_7 \gamma \sin \mu. \quad B = \sin^2(\varphi + \psi) + \cos^2 \gamma [\cos(\varphi + \psi) + I_7 \gamma \sin \mu]^2.$$

$$C = \sin^2 \gamma \cos(\varphi + \psi) - \cos^2 \gamma I_7 \gamma \sin \mu.$$

Вывод уравнения Лагранжа II рода для седьмой массы приведен ниже. Уравнение потенциальной энергии для седьмой массы запишется в следующем виде:

$$T = \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \frac{\dot{\varphi}_7^2}{2} \quad (7)$$

$$\text{Левая часть уравнения имеет вид: } \frac{dT}{dt} \frac{d\dot{\varphi}_7}{d\dot{\varphi}_7} - \frac{dT}{d\varphi_7} = \frac{dT}{dt} \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \dot{\varphi}_7 - \frac{dT}{d\varphi_7} =$$

$$= \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \ddot{\varphi}_7 + \left\{ \frac{dT}{d\varphi_7} \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \right\} \dot{\varphi}_7 - \frac{dT}{d\varphi_7} \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \frac{\dot{\varphi}_7}{2} =$$

$$= \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \ddot{\varphi}_7 + \left\{ \frac{dT}{d\varphi_7} \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \right\} \dot{\varphi}_7 - \left\{ \frac{dT}{d\varphi_7} \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \right\} \frac{\dot{\varphi}_7^2}{2} =$$

$$= \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \ddot{\varphi}_7 + \left\{ \frac{dT}{d\varphi_7} \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] \right\} \frac{\dot{\varphi}_7^2}{2} \quad (8)$$

$$\text{Тогда } \frac{dT}{d\varphi_7} \left[I_7 + (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) i_{ку}^2 \right] = (I_7' + I_7'' \cdot i_{kn}^2) 2 i_{ку} \frac{d i_{ку}}{d\varphi_7} + I_7'' 2 i_{kn} \frac{d i_{kn}}{d\varphi_7} i_{ку}^2, \quad (9)$$

$$\text{где } i_{ку} = \frac{tg \delta \cos \varphi_7}{1 + tg^2 \delta \sin^2 \varphi_7}; \quad \frac{di_{ку}}{d\varphi_7} = -\frac{tg \delta \sin \varphi_7 (1 + \sin^2 \delta \cos^2 \varphi_7)}{\cos^2 \delta (1 + tg^2 \delta \sin^2 \varphi_7)^2}; \quad \frac{di_{ку}}{d\varphi_7} = \frac{di_{ку}}{d\alpha} \frac{d\alpha}{d\varphi_7} = \frac{di_{ку}}{d\alpha} i_{ку}.$$

$$\frac{di_{ку}}{d\alpha} = \frac{-tg \gamma tg \mu \sin(\alpha + \varphi) \cdot \cos \gamma \{ \cos \gamma [\cos^2(\alpha + \varphi) + tg \gamma tg \mu] + \sin^2(\alpha + \varphi) \}^2}{\cos \gamma \{ \cos \gamma^2 [\cos^2(\alpha + \varphi) + tg \gamma tg \mu] + \sin^2(\alpha + \varphi) \}} \cdot \frac{[1 + tg \gamma tg \mu \cos(\alpha + \varphi)] \cdot \{ \cos^2 \gamma [2 \cos(\alpha + \varphi) + tg \gamma tg \mu] + [-\sin(\alpha + \varphi) + 2 \sin(\alpha + \varphi) \cos(\alpha + \varphi)] \}}{\cos \gamma \{ \cos \gamma^2 [\cos^2(\alpha + \varphi) + tg \gamma tg \mu] + \sin^2(\alpha + \varphi) \}} = \frac{\cos \gamma \{ \cos \gamma^2 [\cos^2(\alpha + \varphi) + tg \gamma tg \mu] + \sin^2(\alpha + \varphi) \} \times \left\{ tg \gamma tg \mu + \frac{2(1 + tg \gamma tg \mu \cos(\alpha + \varphi)) [\sin^2 \gamma \cos(\alpha + \varphi) - \cos^2 \gamma tg \gamma tg \mu]}{\cos \gamma^2 [\cos^2(\alpha + \varphi) + tg \gamma tg \mu] + \sin^2(\alpha + \varphi)} \right\}}{\cos \gamma \{ \cos \gamma^2 [\cos^2(\alpha + \varphi) + tg \gamma tg \mu] + \sin^2(\alpha + \varphi) \}} \quad (10)$$

Обозначив $A = 1 + \cos(\alpha + \varphi) tg \gamma tg \mu$;

$B = \sin^2(\alpha + \varphi) + \cos^2 \gamma [\cos(\alpha + \varphi) + tg \gamma tg \mu]^2$ и $C = \sin^2 \gamma \cos(\alpha + \varphi) - \cos^2 \gamma tg \gamma tg \mu$ получаем уравнение потенциальной энергии для седьмой массы.

$$\frac{dI_7}{d\varphi_7} = -2I_7^* \frac{\sin(\alpha + \varphi) \cos^3 \gamma \cdot A}{B^2} \left(tg \gamma tg \mu + \frac{2AC}{B} \right) \cdot \left(\frac{tg \delta \cos \varphi_7}{1 + tg^2 \delta \sin^2 \varphi_7} \right) - 2 \left(I_7^* + I_7^* \frac{\cos^2 \gamma A^2}{B^2} \right) \times \frac{tg^2 \delta \sin^2 \varphi_7 (1 + \sin^2 \delta \cos^2 \varphi_7)}{\cos^2 \delta (1 + tg^2 \delta \sin^2 \varphi_7)^3} \quad (11)$$

Для решения системы дифференциальных уравнений была разработана программа на ПЭВМ и получены числовые значения. По результатам расчетов построены графики изменения моментов на ведущем валу привода режущего аппарата, ведущем и ведомом валах колебателя (рисунок 2). В результате анализа приведенных на графиках зависимостей можно сделать следующие выводы: подбором параметров универсального шарнира можно добиться существенного снижения размаха моментов инерции масс, при этом снижаются крутящие моменты на ведущем и ведомом валах колебателя и ведущем валу привода режущего аппарата. Так при $\gamma = 30^\circ$, $\mu = 60^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ значения моментов снизились в 1,45 раза на ведущем валу колебателя, в 1,39 раза на ведомом валу колебателя и в 1,45 раза на ведущем валу привода, размах крутящего момента при этом снизился в 1,45, 1,47 и 1,39 раза соответственно.

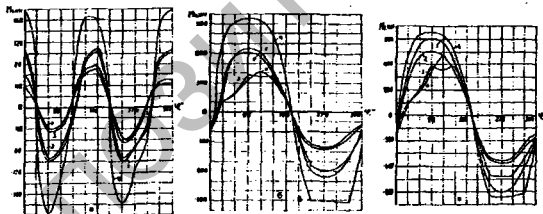


Рисунок 2. – Изменение крутящего момента

а – на валу привода режущего аппарата; б – на ведущем валу колебателя; в – на ведомом валу колебателя. При $\gamma = 30^\circ$; 1 – $\mu = 90^\circ$; 2 – $\mu = 80^\circ$; 3 – $\mu = 60^\circ$; 4 – $\mu = 120^\circ$; 5 – $\mu = 60^\circ$; $\varphi = 45^\circ$.

Литература

1. Ривин Е.И. Динамика привода станков / М.: Машиностроение, 1966. – 204 с.
2. Барский И.Б., Анилович В.Я., Кутьков Г.М. Динамика трактора / М. Машиностроение, 1973. – 280 с.
3. Лурье А.Б. Статическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / Л.: Колос. 1970. – 376с.