

УДК 631.365.4

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СИЛОВОГО МЕТОДА СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВОДА СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА ТИПА «ПОЛЕСЬЕ»

**Л. И. Бойко,**

гл. науч. сотр. Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, докт. техн. наук

**Н. Л. Ракова,**

доцент каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

**Т. В. Бойко,**

доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

**А. С. Воробей,**

ст. науч. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук

*На основании результатов силового расчета механизма обоснован метод снижения нагруженности привода механизма путем применения силового метода снижения динамической нагруженности привода.*

*Ключевые слова: система очистки, привод возвратно-поступательного движения, силовой метод, инерционные силы, надежность, колеблющиеся массы, нагруженность привода.*

*On the basis of results of power calculation of the mechanism the method of decrease in loading of the drive of the mechanism by application of a power method of decrease in dynamic loading of the drive is reasonable.*

*Keywords: system of cleaning, the back and forth motion drive, a power method, inertial forces, reliability, the fluctuating masses, loading of the drive.*

### Введение

В условиях развития рыночных отношений и обострения конкуренции товаропроизводителей на рынке СНГ и мировых рынках, одной из задач, обеспечивающих подъем экономики Республики Беларусь, является выход отечественного сельскохозяйственного машиностроения на качественно новый уровень создаваемой техники с высокими требованиями к их производительности, надежности, энергопотреблению и эксплуатационным характеристикам. При этом сохраняется тенденция к повышению удельной энергонасыщенности машин, скоростей их движения и, как следствие, возрастанию передаваемых нагрузок.

Наиболее ответственными системами большинства современных сельскохозяйственных машин, часто лимитирующими надежность, качественные и эксплуатационные характеристики, являются приводы их рабочих органов с возвратно-поступательными движениями, поскольку даже при установившемся движении им присущи знакопеременные инерционные силы, создаваемые колеблющимися массами, например, привод системы очистки зерноуборочных комбайнов. Компания «Гомсельмаш» выпускает зерноуборочные комбайны «Полесье», каждый из которых в своем классе обеспечивает быструю, качественную и экономную уборку в широком

диапазоне урожайности для любых условий и культур.

В зерноуборочных комбайнах применяют решетчатые очистки с жалюзийными решетками нагнетательным воздушным потоком.

Площадь решет  $S_p$  должна соответствовать номинальной пропускной способности  $q_{он}$ , а среднее отношение должно быть в пределах

$$S_p / q_{он} = 0,4 \dots 0,5 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{кг}}$$

где  $S_p$  – площадь решет,  $\text{м}^2$

$q_{он}$  – номинальная пропускная способность,  $\text{кг/с}$

В таблице 1 представлены значения отношений площади решета к номинальной пропускной способности для всех классов зерноуборочных комбайнов типа «Полесье».

Приводы очисток зерноуборочных комбайнов

**Таблица 1. Значения отношений площади решета к номинальной пропускной способности зерноуборочных комбайнов в зависимости от марки**

Марка	GS07	GS812	GS10	GS12	GS14
$S_p, \text{м}^2$	3,86	3,86	5	5	5,8
$q_{он}, \text{кг/с}$	7	8	10	12	14
$S_p / q_{он}, \frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{кг}}$	0,55	0,48	0,5	0,42	0,42

типа «Полесье» унифицированы и относятся к приводам с колеблющимися рабочими органами (с возвратно-поступательным движением последних). На зерноуборочных комбайнах типа «Полесье» устанавливается система очистки с верхним и нижним решетчатыми станами.

В системе очистки зерноуборочного комбайна GS10 (рис. 1) нижний решетчатый стан 10 и стрясная доска 1 колеблются в противофазе с верхним решетом 6, удлинителем 8 и дополнительным решетом 3.

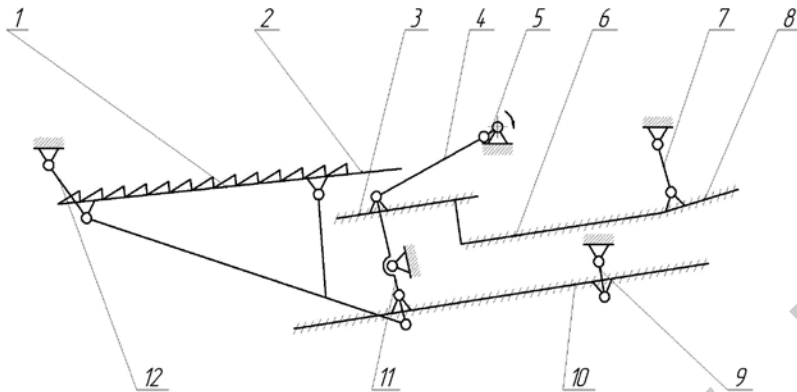


Рисунок 1. Схема очистки зерноуборочного комплекса GS10:  
1 – стрясная доска; 2 – пальцевая решетка; 3 – дополнительное решето; 4 – шатун; 5 – кривошип; 6 – верхнее решето; 7, 9, 12 – шарнирные подвески; 8 – удлинитель верхнего решета; 10 – нижнее решето; 11 – двуплечий рычаг

Поскольку суммарная масса стрясной доски 1 и нижнего решета 10 незначительно больше массы верхнего решетчатого стана, а амплитуда колебаний большей массы меньше, то данная очистка является в достаточной степени уравновешенной.

Удачна схема очистки и тем, что она не содержит дополнительных кривошипов и шатунов. Однако действие значительных знакопеременных инерционных нагрузок от колеблющихся масс не только вызывает колебания рамы комбайна, но и нагружает привод системы очистки, что вызывает повышенный износ в шарнирах привода.

Объектом исследования выбрана система очистки зернового вороха зерноуборочного комплекса GS10, как одна из наиболее уравновешенных. Кроме того, сам комплекс, включающий очистку, является крайне перспективным – его энергетическое устройство может быть использовано с другими адаптерами для уборки трав, кукурузы, свеклы, что позволяет резко повысить его эффективность.

### Основная часть

Так как в данной работе решается вопрос снижения инерционной составляющей нагруженности привода системы очистки, для выбора мер, необходимых для уравновешивания механизма системы очистки зерноуборочного комплекса GS10, необходимо выполнить его силовой расчет. На основании результатов выполненных расчетов механизма необходимо выбрать меры для снижения воздействия привода на

раму машины (путем перераспределения колеблющихся масс), либо для снижения нагруженности самого привода механизма (путем применения кинематического либо силового метода снижения динамической нагруженности приводов).

Силы инерции каждого звена приводятся к главному моменту пары сил инерции и главному вектору сил инерции, приложенных в центре масс звена [1].

$$\vec{F}_{Mi} = -\vec{a}_{Mi} m_i, \quad (1)$$

$$M_i = -\varepsilon_i J_{Mi}, \quad (2)$$

где  $F_{Mi}$  – сила инерции  $i$ -того звена механизма, приложенная в центре масс  $i$ -того звена, Н;

$a_{Mi}$  – ускорение центра масс  $i$ -того звена механизма,  $m/c^2$ ;

$M_i$  – момент пары сил  $i$ -того звена, Н·м;

$\varepsilon_i$  – угловое ускорение  $i$ -того звена,  $c^2$ ;

$J_{Mi}$  – момент инерции  $i$ -того звена относительно оси, проходящей через центр масс  $M_i$  и перпендикулярной к плоскости движения звена,  $кг/м^2$ .

Механизм делится на кинематические пары. Расчет сил реакций в кинематических парах ведется с конца кинематической цепочки.

Первой кинематической парой, в которой производится расчет сил реакций от воздействия инерционных нагрузок, является пара звеньев, составляющих четырехзвеновик без ведущего звена (рис. 2). Схемы к расчету второй, третьей и четвертой кинематическим парам приведены на рисунках 3, 4 и 5 соответственно. Расчетная схема определения реакций в опоре ведущего звена и движущего момента механизма очистки приведена на рисунке 6.

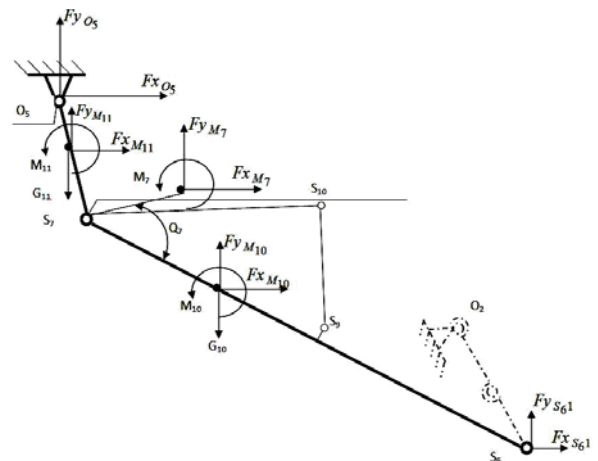


Рисунок 2. Расчетная схема определения реакций в кинематической паре 1

К центру масс каждого звена механизма приложена сила веса звена (на расчетной схеме может не указываться), направленная всегда вниз и численно равная:

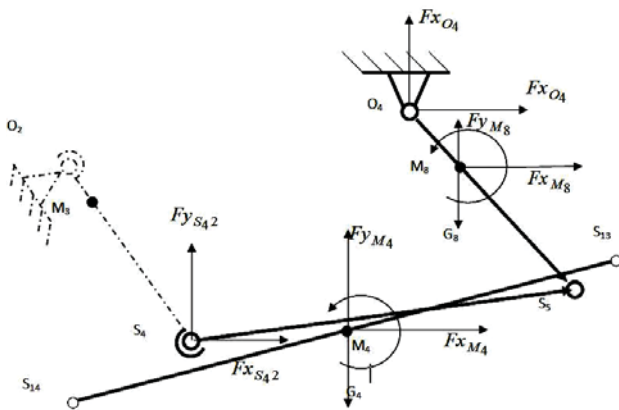


Рисунок 3. Расчетная схема определения реакций в кинематической паре 2

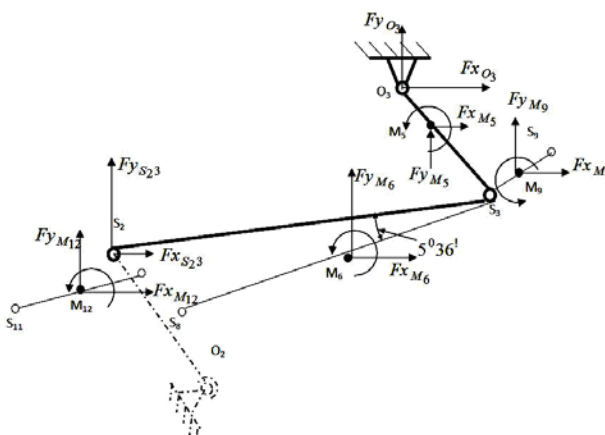


Рисунок 4. Расчетная схема определения реакций в кинематической паре 3

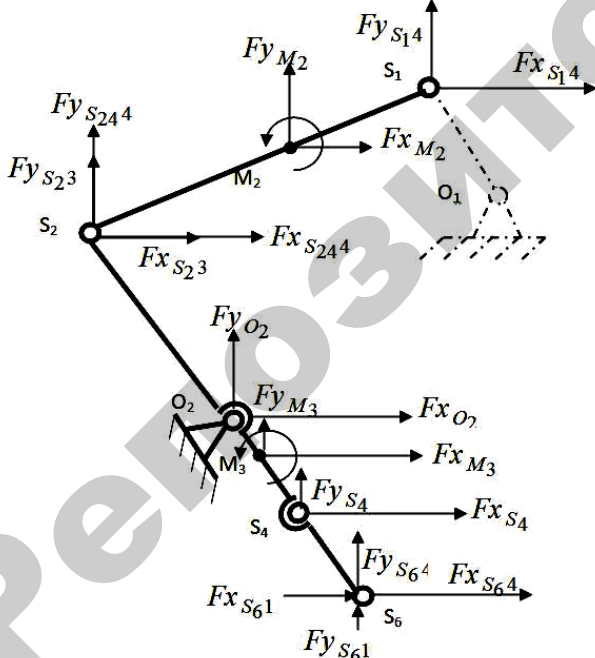


Рисунок 5. Расчетная схема определения реакций в кинематической паре 4

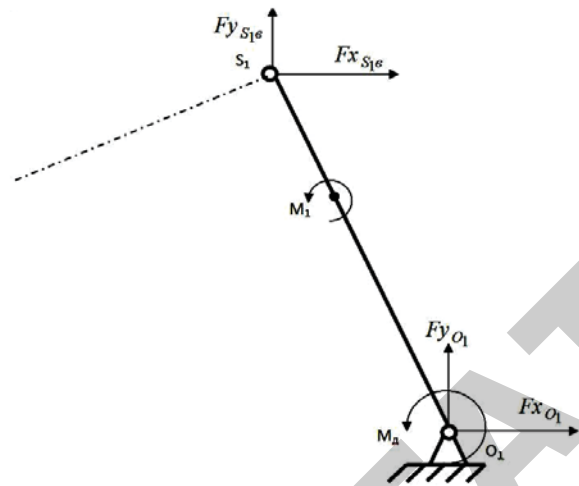


Рисунок 6. Расчетная схема определения реакций в опоре ведущего звена и движущего момента механизма очистки

$$G_i = g m_i, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;

$m_i$  – масса  $i$ -того звена, кг.

Для каждой кинематической пары составляются уравнения равновесия сил и моментов по принципу Д’аламбера [3]. Для первой кинематической пары (рис. 2) сумма проекций сил на оси координат имеет вид:

– на ось X:

$$F_{x_{S_6,1}} + F_{x_{M_{10}}} + F_{x_{M_7}} + F_{x_{M_{11}}}; + \\ + F_{x_{O_5}} = 0; \quad (4)$$

– на ось Y:

$$F_{y_{S_6,1}} + (F_{y_{M_{10}}} - G_{10}) + (F_{y_{M_7}} - G_7) + \\ + (F_{y_{M_{11}}} - G_{11}) + F_{y_{O_5}} = 0. \quad (5)$$

Сумма моментов звена  $S_6S_7$  относительно точки  $S_7$ :

$$F_{x_{S_6,1}} |Y_{S_6} - Y_{S_7}| + F_{y_{S_6,1}} |X_{S_6} - X_{S_7}| + F_{x_{SM_{10}}} \times \\ \times |Y_{M_{10}} - Y_{S_7}| + M_{10} + (F_{y_{SM_{10}}} - G_{10}) \times \\ \times |X_{M_{10}} - X_{S_7}| - F_{x_{SM_7}} |Y_{M_7} - Y_{S_7}| + \\ + (F_{y_{SM_7}} - G_7) |X_{M_7} - X_{S_7}| + M_7 = 0. \quad (6)$$

Сумма моментов звена  $O_5S_7$  относительно точки  $S_7$ :

$$-F_{x_{M_{11}}} |Y_{M_{11}} - Y_{S_7}| - (F_{y_{M_{11}}} - G_{11}) |X_{M_{11}} - X_{S_7}| + \\ + M_{11} - F_{x_{O_5}} |Y_{O_5} - Y_{S_7}| - F_{y_{O_5}} |X_{O_5} - X_{S_7}| = 0. \quad (7)$$

Таким образом, для каждой кинематической пары составляется система из четырех уравнений равновесия.

Если в правые части уравнений 4, 5, 6, 7 перенести известные члены уравнений и обозначить их как, соот-

ветственно,  $b_1, b_2, b_3, b_4$ , то систему данных уравнений можно представить в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ ly_{S_6S_7} & 0 & lx_{S_6S_7} & 0 \\ 0 & -ly_{O_5S_7} & 0 & -lx_{O_5S_7} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Fx_{S_6} \\ Fx_{O_5} \\ Fy_{S_6} \\ Fy_{O_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где плечи моментов соответствующих сил равны:

$$ly_{S_6S_7} = |Y_{S_6} - Y_{S_7}|; \quad (9)$$

$$lx_{S_6S_7} = |X_{S_6} - X_{S_7}|; \quad (10)$$

$$ly_{O_5S_7} = |Y_{O_5} - Y_{S_7}|; \quad (11)$$

$$lx_{O_5S_7} = |X_{O_5} - X_{S_7}|, \quad (12)$$

а правые части уравнений имеют вид:

$$b_1 = -(Fx_{M_{10}} + Fx_{M_7} + Fx_{M_{11}}); \quad (13)$$

$$b_2 = -[(Fy_{M_{10}} - G_{10}) + (Fy_{M_7} - G_7) + (Fy_{M_{11}} - G_{11})]; \quad (14)$$

$$b_3 = -\{Fx_{SM_{10}} |Y_{M_{10}} - Y_{S_7}| + M_{10} + (Fy_{SM_{10}} - G_{10}) |X_{M_{10}} - X_{S_7}| - \\ - Fx_{SM_7} |Y_{M_7} - Y_{S_7}| + (Fy_{SM_7} - G_7) |X_{M_7} - X_{S_7}| + M_7\}; \quad (15)$$

$$b_4 = -\{-Fx_{M_{11}} |Y_{M_{11}} - Y_{S_7}| - (Fy_{M_{11}} - G_{11}) |X_{M_{11}} - X_{S_7}| + M_{11}\}. \quad (16)$$

Решение уравнения 8 относительно реакций в первой кинематической паре дает следующие значения:

$$Fx_{S_6} = -\frac{b_1 ly_{O_5S_7} lx_{S_6S_7} + b_2 lx_{S_6S_7} lx_{O_5S_7} - b_3 lx_{O_5S_7} + b_4 lx_{S_6S_7}}{ly_{S_6S_7} lx_{O_5S_7} - lx_{S_6S_7} ly_{O_5S_7}}; \quad (17)$$

$$Fx_{O_5} = \frac{b_1 ly_{S_6S_7} lx_{O_5S_7} + b_2 lx_{S_6S_7} lx_{O_5S_7} - b_3 lx_{O_5S_7} + b_4 lx_{S_6S_7}}{ly_{S_6S_7} lx_{O_5S_7} - ly_{O_5S_7} lx_{S_6S_7}}; \quad (18)$$

$$Fy_{S_6} = \frac{b_1 ly_{S_6S_7} ly_{O_5S_7} + b_2 ly_{S_6S_7} lx_{O_5S_7} - b_3 ly_{O_5S_7} + b_4 ly_{S_6S_7}}{ly_{S_6S_7} lx_{O_5S_7} - ly_{O_5S_7} lx_{S_6S_7}}; \quad (19)$$

$$Fy_{O_5} = -\frac{b_1 ly_{S_6S_7} ly_{O_5S_7} + b_2 ly_{O_5S_7} lx_{S_6S_7} - b_3 ly_{O_5S_7} + b_4 ly_{S_6S_7}}{ly_{S_6S_7} lx_{O_5S_7} - ly_{O_5S_7} lx_{S_6S_7}}. \quad (20)$$

Составляющие сил реакций в шарнире  $S_7$  первой кинематической пары находятся из условий равновесия одного звена, например  $O_5S_7$ :

$$Fx_{S_7} + Fx_{M_{11}} + Fx_{O_5} = 0; \quad (21)$$

$$Fx_{S_7} = -(Fx_{M_{11}} + Fx_{O_5}), \quad (22)$$

$$Fy_{S_7} + (Fy_{M_{11}} - G_{11}) + Fy_{O_5} = 0, \quad (23)$$

$$Fy_{S_7} = -(Fy_{M_{11}} - G_{11} + Fy_{O_5}). \quad (24)$$

Значения сил реакций определяются по формуле:

$$F_i = \sqrt{Fx_i^2 + Fy_i^2} \quad (25)$$

Направление сил реакций определяется углом  $\varphi$ :

$$\varphi_{F_i} = \arctg \frac{Fy_i}{Fx_i} \quad (26)$$

Аналогично рассчитываются реакции и в остальных кинематических парах механизма системы очистки согласно расчетным схемам (рис. 3...5).

Кинематическая пара, в которую входит ведущее звено и стойка, является вращательной парой пятого класса. Чтобы ведущее звено находилось в равновесии, к нему прикладывается движущий момент механизма (рис. 6). В шарнире  $S_1$  приложена сила реакции  $F_{S1\theta}$ , равная по величине силе реакции в этом шарнире  $F_{S14}$  от кинематической пары 4 и направленная противоположно:

$$Fx_{O_1} + Fx_{M_1} + Fx_{S_{1\theta}} = 0, \quad (27)$$

$$Fx_{O_1} = -(Fx_{M_1} + Fx_{S_{1\theta}}), \quad (28)$$

$$Fy_{O_1} + (Fy_{M_1} - G_1) + Fy_{S_{1\theta}} = 0, \quad (29)$$

$$Fy_{O_1} = -(Fy_{M_1} - G_1 + Fy_{S_{1\theta}}), \quad (30)$$

$$\begin{aligned} M_d + M_1 - Fx_{M_1} |Y_{M_1} - Y_{O_1}| - \\ - (Fy_{M_1} - G_1) \times |X_{M_1} - X_{O_1}| - \\ - Fx_{S_{1\theta}} |Y_{S_1} - Y_{O_1}| - Fy_{S_{1\theta}} \times \\ \times |X_{S_1} - X_{O_1}| = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} M_d = - \{ M_1 - Fx_{M_1} |Y_{M_1} - Y_{O_1}| - \\ (Fy_{M_1} - G_1) |X_{M_1} - X_{O_1}| - Fx_{S_{1\theta}} \times \\ \times |Y_{S_1} - Y_{O_1}| - Fy_{S_{1\theta}} |X_{S_1} - X_{O_1}| \} = 0. \end{aligned} \quad (32)$$

Для уравнивания сил инерции относительно рамы механизма необходимо, чтобы центр масс механизма был неподвижен [4]:

$$X_{cm} = const; \quad Y_{cm} = const, \quad (33)$$

где  $X_{cm}$ ,  $Y_{cm}$  – координаты общего центра масс механизма, определяемые по формулам:

$$X_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{cm_i} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (34)$$

$$Y_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{cm_i} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (35)$$

Траектория координат центра масс механизма очистки за один оборот представлена графически на рисунке 7.

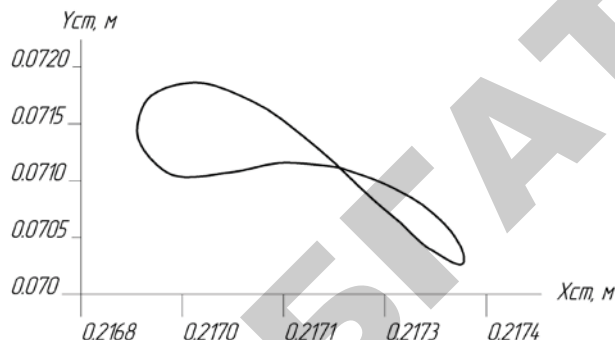


Рисунок 7. Траектория движения центра масс механизма очистки за один оборот приводного вала

Как видно из графика (рис. 7), условия (34, 35) для уравнивания механизма очистки практически выполнено: по горизонтали максимальное смещение составляет 0,483 мм, по вертикали – 1,614 мм (для сравнения – максимальное смещение центра тяжести системы очистки зерноуборочного комбайна «Дон-1500Б» по горизонтали для серийного привода составляет 7 см, для уравновешенного – 5 мм [3]). Следовательно, воздействие инерционных сил на раму сведено к минимуму и дополнительных мер для устранения их воздействия не требуется.

Для устранения воздействия сил инерции на привод механизма необходимо, чтобы главный момент сил инерции был равен нулю:

$$\Sigma M_{ui} = 0, \quad (36)$$

где  $\Sigma M_{ui}$  – главный момент сил инерций механизма системы очистки.

График главного момента сил инерции механизма очистки относительно оси двуплечего рычага приведен на рисунке 8.

Как видно из графика (рис. 8), условие (36) не выполняется – на привод механизма системы очистки действуют значительные динамические нагрузки, возникающие вследствие неуравновешенности главного момента сил инерции механизма.

### Выводы

Предпринятые меры при проектировании механизма системы очистки позволили минимизировать воздействие инерционных сил на раму машины, однако разгрузить привод механизма не удалось. Из приведенных расчетов следует, что для повышения надежности и долговечности рассматриваемого механизма представляется целесообразным решение зада-

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ  
ЛИТЕРАТУРЫ**

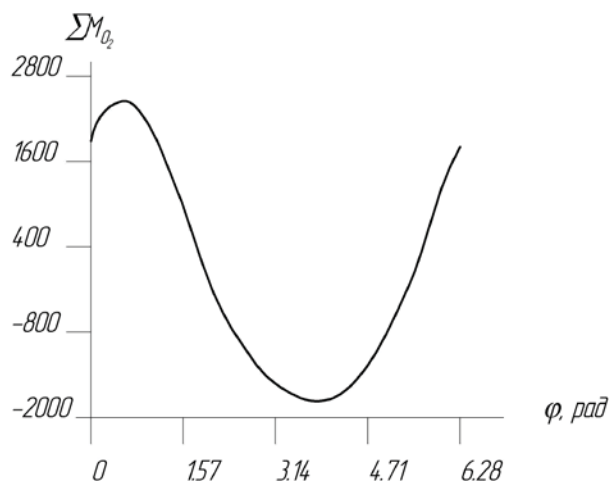


Рисунок 8. График главного момента сил инерции механизма очистки (относительно оси опоры  $O_2$ )

чи снижения нагруженности его привода посредством использования силового метода снижения динамической нагруженности приводов [5].

1. Артоболевский, И.И. Методы уравнивания сил инерции в рабочих машинах со сложными кинематическими схемами / И.И. Артоболевский. – М.-Л.: Академия наук СССР, 1938. – 46 с.
2. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1975. – 638 с.
3. ОАО «Лидагпроммаш» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lidagro.by/>. – Дата доступа: 28.11.2010.
4. Озол, О.Г. Кинематические характеристики движения ползуна кривошипно-шатунного механизма / О.Г. Озол // Труды Латвийской сельскохозяйственной академии. – Рига, 1958. – Вып. 7. – С. 143-157.
5. Щербаков, В.М. Уравнивание системы очистки комбайна «Дон-1500Б» / В.М. Щербаков, Н.И. Стрикунов // Вестник Алтайского гос. аграрного университета, 2007. – № 7. – С. 48–50.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 25.07.2016

**Пористые волокновые материалы**

**Предназначены** для очистки жидкостей, газов от твердых частиц и жидких аэрозолей.



**Основные технические данные**

Тонкость очистки ППМ	
- при фильтрации газов	0,5...20 мкм
- при фильтрации жидкостей	1...100 мкм

Фильтры используются для очистки сжиженных и сжатых газов при их производстве и практическом использовании, отходящих газов в технологических циклах химического, биотехнологического, металлургического, цементного и др. производств, для очистки воды, горюче-смазочных материалов, пищевых продуктов (соки, пиво и др.), смол, основ для лаков, расплавов солей и полимеров.