

УДК 622.232.72

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ

Бойко Е.Н., канд. техн. наук, доц.,  
Бойко Н.Г., докт. техн. наук, проф.

Донецкий национальный технический университет

*В работе рассмотрен вопрос об обеспечении устойчивой работы технологических машин при переменной нагрузке, формирующейся на их рабочих органах.*

*The authors consider the problem of ensuring the stability of functioning of technological machines affected by variable loads formed in their working tools.*

**Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.** Большинство технологических машин (металлорежущие станки, очистные и проходческие комбайны, экскаваторы и др.) относятся к машинам, которые с точки зрения динамики можно определять, как замкнутые динамические системы с глубокой обратной силовой связью. Это означает, что эти машины относятся к классу динамических машин, т.е. упруго деформируемых при рабочих нагрузках, а внешней нагрузкой этих машин является нагрузка, формируемая на их рабочих (исполнительных) органах при взаимодействии органов с «внешней» средой. В качестве «внешней» среды выступает разрушаемые этими органами или металл, или горная порода. Величина этой нагрузки обуславливается, с одной стороны, прочностью разрушаемой среды, с другой, – режимом разрушения этой среды. Характер нагрузки определяется динамическими свойствами системы привода исполнительного органа машины. Примером нагрузки в системе привода исполнительного органа очистного комбайна является осциллограмма упругого момента в валопроводе, приведенная на рис. 1, график нормированной спектральной плотности дисперсии момента показан на рис. 2.

Как видно из приведенного фрагмента осциллограммы и графика спектральной плотности дисперсии момента, нагрузка в валопроводе крайне неравномерная и содержит две так называемых

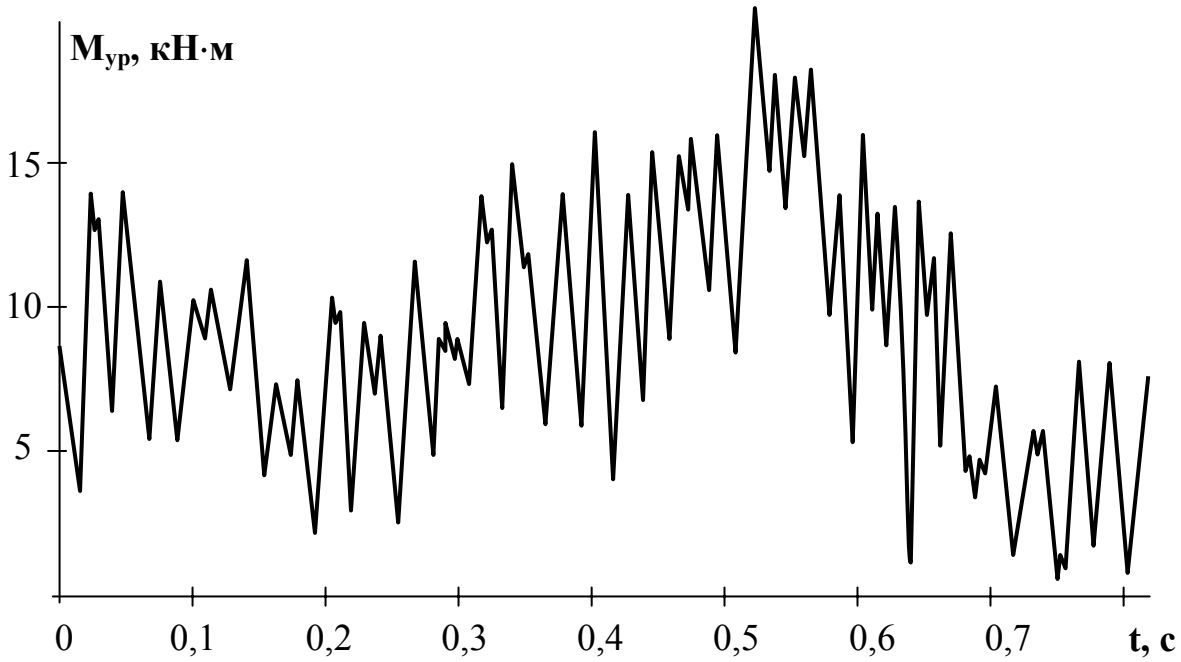


Рис. 1 – Фрагмент осциллограммы упругого момента в валопроводе очистного комбайна в рабочем режиме (шахтные исследования)

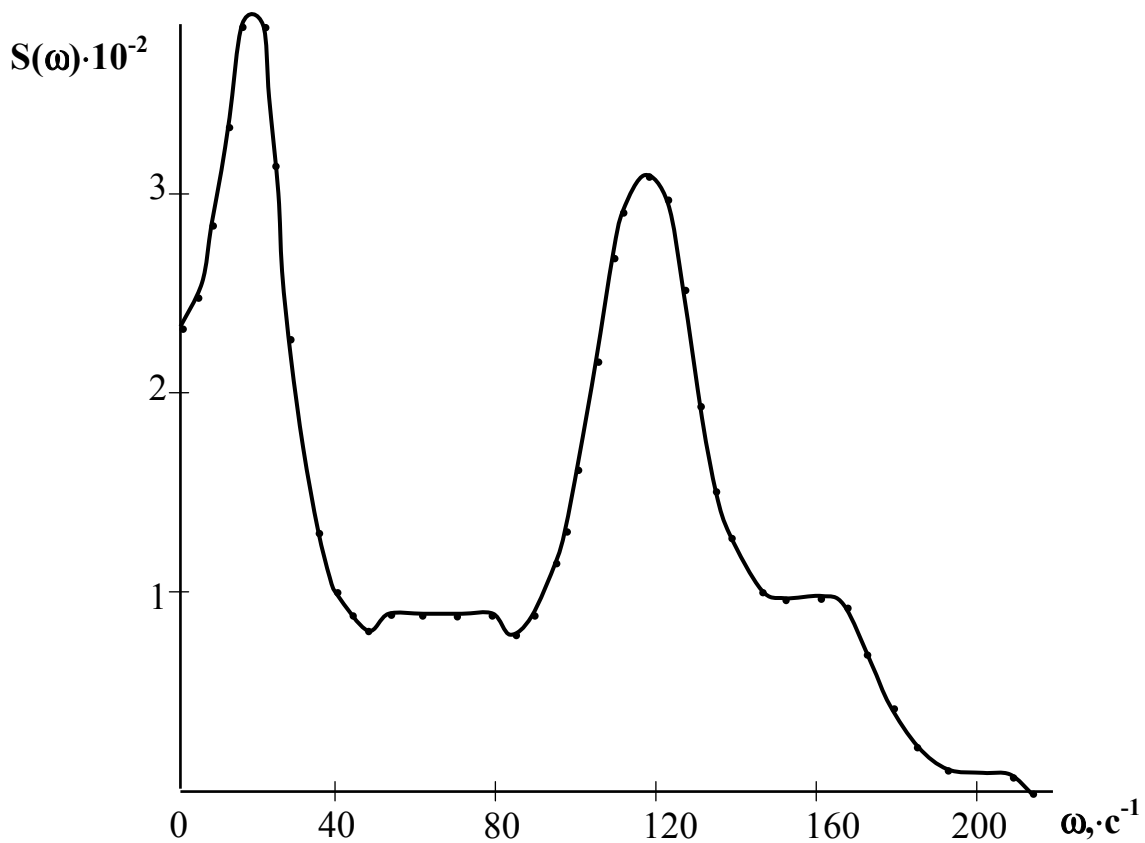


Рис. 2 – График нормированной спектральной плотности дисперсии упругого момента в валопроводе привода исполнительного органа очистного комбайна (по данным шахтных исследований)

несущих частоты, которые будем именовать низкой (примерно до  $20 \text{ с}^{-1}$ ) и высокой (примерно  $120 \text{ с}^{-1}$ ) частотами. Исследованиями [1, 2] установлено, что низкочастотная составляющая упругого момента (в дальнейшем нагрузка) обуславливается неравномерностью схемы набора режущего инструмента на рабочем (исполнительном) органа комбайна и частотой его вращения, высокочастотная составляющая нагрузки – упруго-диссипативными свойствами привода органа.

**Анализ исследований и публикаций.** Вопросу формирования указанного характера нагрузки в приводах исполнительных органом рассматриваемых типов машин, влияния его на их производительность и ресурс посвящено довольно много исследований. Кроме указанных источников, следует указать работы [3-7 и ряд др.], выполненные под руководством проф. Я.И. Альшица, В.Г. Гуляева, Г.В. Малеева, Ю.Д. Красникова, А.К. Семенченко, П.А. Горбатова, в которых рассмотрены эти или близкие к ним вопросы. Вместе с тем, вопрос, как обеспечить устойчивую работу машины при таком характере нагрузки, нуждается в дальнейшей разработке.

**Постановка задачи.** Не вдаваясь более глубоко и детально в анализ такого характера нагрузки для рассматриваемых типов технологических машин, рассмотрим вопрос об обеспечении устойчивой работы этих машин при таком характере их нагрузки.

**Изложение материала и результаты.** Устойчивая, без опрокидывания двигателя привода исполнительного органа машины будет при выполнении условия, которое аналитически можно представить в виде

$$M_{c.d} \leq M_{\phi.\max}, \quad (1)$$

где  $M_{c.d}$ ,  $M_{\phi.\max}$  – соответственно момент сил сопротивления в валопроводе привода исполнительного органа комбайна, приведенный к валу двигателя, и фактический максимальный момент двигателя.

Представим  $M_{c.d}$  в виде

$$M_{c.d} = M_0 + \sum_i k_{d.i} M_{a.i} \sin(\omega_i t + \xi_i) \quad (2)$$

где  $M_0$ ,  $M_{a.i}$  – соответственно средняя величина и амплитуда на  $i$ -ой частоте момента сил сопротивления,  $k_{d.i}$  – коэффициент динамичности привода исполнительного органа на  $i$ -ой частоте,  $\omega_i$ ,  $\xi_i$  – соответственно  $i$ -ая частота и фаза момента,  $t$  – продолжительность.

Принимая во внимание, что даже при разветвленной схеме привода исполнительного органа комбайна, к двигателю «подходит» только один участок валопровода, т.е.  $i = 2$ , и обозначив амплитуду, частоту и фазу момента с  $i = 1 - M_{a.1} \equiv M_{нч}$ ,  $\omega_1 \equiv \omega_{нч}$ ,  $\xi_1 \equiv \xi_{нч}$ , а с  $i = 2 - M_{a.2} \equiv M_{вч}$ ,  $\omega_2 \equiv \omega_{вч}$ ,  $\xi_2 \equiv \xi_{вч}$  и учитывая, что  $k_{\partial.1} \equiv 1$ , а  $k_{\partial.2}$  обозначим  $k_{\partial}$ , выражение ( 2 ) примет вид

$$M_{c.\partial} = M_0 + M_{нч} \sin(\omega_{нч}t + \xi_{нч}) + k_{\partial}M_{вч} \sin(\omega_{вч}t + \xi_{вч}) \quad ( 3 )$$

Далее, учитывая, что отношение  $\omega_{вч} / \omega_{нч} \geq 10$ , т.е. частоты этих составляющих момента отличаются не менее чем на порядок, всегда найдется такой момент во времени, когда амплитуды момента сил сопротивления совпадут. Это и будет наибольший момент сил сопротивления, приведенный к валу двигателя. Тогда выражение ( 3 ) представим в виде

$$M_{c.\partial}^{\max} = M_0 + M_{нч} + k_{\partial}M_{вч} . \quad ( 4 )$$

Обозначим

$$\frac{M_0 + M_{нч}}{M_0} = k_{нч} , \quad \text{а} \quad \frac{M_{вч}}{M_0} = k_{вч} ,$$

выражение ( 4 ) примет вид

$$M_{c.\partial}^{\max} = k_{нч}M_0(1 + k_{\partial}k_{вч}) . \quad ( 5 )$$

Приравняв в выражении ( 5 )  $M_{c.\partial}^{\max}$  к  $M_{\phi.\max}$  и решив его относительно  $M_0$ , будем иметь

$$M_0 = \frac{M_{\phi.\max}}{k_{нч}(1 + k_{\partial}k_{вч})} , \quad ( 6 )$$

который принято называть **устойчивым моментом двигателя** и обозначать  $M_{yc}$ , т.е.

$$M_0 = \frac{M_{\phi.\max}}{k_{нч}(1 + k_{\partial}k_{вч})} \equiv M_{yc} . \quad ( 7 )$$

Таким образом, под устойчивым моментом двигателя при переменном характере нагрузки понимается момент, численно равный тому наибольшему среднему моменту сил сопротивления, приведен-

ному к валу двигателя с учетом его неравномерности и динамических свойств привода исполнительного органа, при котором еще возможна устойчивая без опрокидывания двигателя работа машины.

Представим  $M_{\phi.\max}$  в виде

$$M_{\phi.\max} = M_{\max} \left( \frac{U_{\phi}}{U_n} \right)^2 \equiv M_{\max} \left( 1 - \frac{\Delta U}{U_n} \right)^2, \quad (8)$$

где  $M_{\max}$  – максимальный каталожный момент двигателя,  $U_{\phi}$ ,  $U_n$ ,  $\Delta U$  – соответственно фактическое, номинальное напряжение питания двигателя и падение напряжения.

Или, выразив фактическое напряжение питания двигателя через напряжение на вторичной обмотке питающего трансформатора и параметры питающей сети, получим

$$\begin{aligned} M_{\phi.\max} &= \frac{(U_{mp} - \Delta U_{n.n})^2}{3I_c^2 Z_c^2} M_{\max} \equiv \\ &\equiv \frac{(U_{mp} - \Delta U_{n.n})^2 M_{\max}}{3I_c^2 \left[ (R_{mp} + r_{\kappa} L_{\kappa} + R_{\partial})^2 + (X_{mp} + x_{\kappa} L_{\kappa} + X_{\partial})^2 \right]}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $U_{mp}$  – напряжение на вторичной обмотке питающего трансформатора,  $\Delta U_{n.n}$  – падение напряжения на вторичной обмотке трансформатора от посторонних потребителей,  $I_c$  – ток сети или ток нагрузки,  $R_{mp}$ ,  $X_{mp}$  – соответственно активное и индуктивное сопротивление трансформатора,  $R_{\partial}$ ,  $X_{\partial}$  – соответственно активное и индуктивное сопротивление двигателя машины,  $r_{\kappa}$ ,  $x_{\kappa}$  – соответственно активное и индуктивное удельное сопротивление питающего кабеля,  $L_{\kappa}$  – длина питающего кабеля.

Тогда выражение (7) для устойчивого момента двигателя примет вид

$$M_{yc} = \frac{(U_{mp} - \Delta U_{n.n})^2 M_{\max}}{3I_c^2 \left[ (R_{mp} + r_{\kappa} L_{\kappa} + R_{\partial})^2 + (X_{mp} + x_{\kappa} L_{\kappa} + X_{\partial})^2 \right] k_{H\kappa} (1 + k_{\partial} k_{\partial\kappa})}. \quad (10)$$

Откуда следует, что факторы, обеспечивающие устойчивую работу машины при переменной нагрузке, разделяются на две группы:

1. Электрические. 2. Механические.

Для обеспечения устойчивой работы машины при переменной нагрузке (повышение устойчивого момента двигателя) факторы первой группы должны удовлетворять следующим условиям:

- машина (комбайн) должна питаться от отдельного трансформатора  $\Delta U_{n.n} = 0$ ;
- переход на более высокое напряжение питания – 1140, 3000 В. Это дает двоякую выгоду – повышает напряжение питания и снижает ток сети (нагрузки);
- машины должны комплектоваться высоко моментными двигателями привода исполнительного органа;
- минимально необходимую длину питающего кабеля при максимально возможном сечении его жил. Это обуславливает уменьшение потери напряжения в сети.

Из факторов второй группы, обеспечивающие устойчивую работу машины (повышение устойчивого момента двигателя), в первую очередь следует указать на снижение низкочастотной составляющей формирующейся на исполнительном органе машины нагрузки – момента сил сопротивления – уменьшение  $k_{нч}$ . Исследованиями [ 2 ] установлено, что величина неравномерности низкочастотной составляющей нагрузки при прочих равных условиях обуславливается так называемой конструктивной неуравновешенностью схемы набора режущего инструмента и для исполнительных органов (шнеков) серийно выпускаемых очистных комбайнов достигает величины, равной 1,35. Разработанные под руководством и непосредственном участии автора статьи схемы набора режущего инструмента для шнековых исполнительных органов очистных комбайнов имеют величину неравномерности низкочастотной составляющей нагрузки 1,03-1,05, т.е. в среднем в 1,3 раза меньше, чем неравномерность этой составляющей нагрузки для шнеков серийно выпускаемых очистных комбайнов.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Из вышеизложенного следует: устойчивая работа технологических машин и при переменной нагрузке может быть обеспечена при условии, когда выбран такой режим работы, при котором средняя величина нагрузки двигателя не превосходит его устойчивый момент. Дальнейшие исследования должны быть направлены на установление целесообраз-

ной величины более высокого напряжения питания двигателей рассматриваемых типов машин.

Список источников.

1. Исполнительные органы очистных комбайнов для тонких пологих пластов // Н. Г. Бойко, А.В. Болтян, В.Г. Шевцов, Н.А. Марков. Под ред. Н.Г. Бойко. Донецк, «Донеччина». 1996. – 223 с.
2. Бойко Н.Г. Теория рабочих процессов комбайнов для добычи угля из тонких пологих пластов. Дисс. ... докт.техн.наук.– М., МГИ, 1985.– 287 с.
3. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / Г.В. Малеев, В.Г., Гуляев, Н.Г. Бойко и др. – М.: Недра, 1988. – 368 с.
4. Исследование динамических характеристик системы привода исполнительного органа угольного комбайна МК-67//В.Г. Гуляев, Г.В. Малеев, П.А. Горбатов и др. – В кн.: Повышение надежности и долговечности горных машин. Донецк, 1972, - с. 3 – 15.
5. Моделирование разрушения углей режущими инструментами // Ю.Д. Красников, отв. ред. М., Наука, 1981. – 181 с.
6. Методика исследования динамических характеристик и структуры трансмиссий исполнительных органов угледобывающих комбайнов // В.Г. Гуляев, А.К. Семенченко, П.А. Горбатов и др. – Изв. вузов. Горный журнал, 1973. №11, с. 106-109.
7. Динамические характеристики системы привода исполнительного органа комбайна 1К-101 // Я.И. Альшиц, В.Г. Гуляев, Г.В. Малеев и др. – В кн. Горные машины. Киев, МВССО Украины, 1971, с. 61-87.