

## ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДИСКОВОГО ЗУБЧАТОГО БУНКЕРНОГО ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ ОТКАЗАМИ

Давыдова Е.В., Дружинина А.В., Преис В.В. (ТулГУ, г. Тула, Россия)  
Тел. +7 (4872) 332438; E-mail: [rabota-preys@yandex.ru](mailto:rabota-preys@yandex.ru)

**Abstract:** The mathematical model is tendered, allowing to estimate agency on actual productivity of the mechanic disk dentate hopper feeding device of the parametric failures bound to an exit for permissible limits of an estimated time of driving of a subject of machining in an appropriate spacing of a work cycle of a hopper feeding device.

**Key words:** mathematical model, hopper feeding device, productivity, parametric failures.

Фактическая производительность механического дискового бункерного загрузочного устройства (БЗУ) определяется выражением

$$P_{\text{фБЗУ}} = 60 \frac{v}{h} \eta_{\text{max}} (1 - \varepsilon v^4),$$

где  $v$  – окружная скорость вращающегося диска БЗУ по оси захватывающих органов (в зависимости от их конфигурации и расположения на диске);  $h$  – шаг захватывающих органов;  $\eta_{\text{max}}$  – наибольшая величина коэффициента выдачи, соответствующая малым скоростям захватывающих органов;  $\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности БЗУ.

В работе [1] авторами были даны математические выражения, описывающие зависимости наибольшей величины коэффициента выдачи  $\eta_{\text{max}}$  и коэффициента  $\varepsilon$  от физико-технических параметров загружаемых предметов обработки и конструктивных параметров механического дискового зубчатого БЗУ, а в работе [2] – результаты экспериментальных исследований, подтвердившие адекватность разработанной математической модели фактической производительности (1).

Однако предложенная математическая модель не отражает влияния на фактическую производительность БЗУ параметрических отказов, связанных с возможностью выхода длительности интервалов кинематического цикла БЗУ за расчетные значения.

Технологический цикл механического дискового зубчатого БЗУ (равный его кинематическому циклу) состоит из шести интервалов: подготовки предметов обработки к захвату (), захвата предметов обработки (), пассивного ориентирования (), подготовке к выдаче () и выдачи предметов обработки в приемник (), холостого хода захватывающих органов (). Каждому интервалу цикла соответствует участок пути по окружности вращающегося диска БЗУ или зона интервала.

В пяти первых интервалах технологического цикла, которые назовем рабочими, происходит движение предметов обработки под действием сил тяжести и внешних сил. Время каждого рабочего интервала должно быть больше расчетного времени, необходимого для движения предметов обработки в данном интервале, т.к. в реальных условиях фактическое время движения предмета обработки под воздействием различных случайных факторов может отличаться от расчетного, например, вследствие разброса фактического значения коэффициента трения, т.е. фактическое время движения предметов обработки в рабочих интервалах будет случайной величиной.

Для получения математического описания вероятности параметрических отказов, связанных с возможностью выхода длительности интервалов кинематического цикла БЗУ за расчетные значения, и оценки фактической производительности БЗУ с учетом этого вида отказов используем известный методологический подход, представленный в работе [3].

Условие случайного выхода времени движения предмета обработки за расчетное предельное значение  $[t_p]_i$  в  $i$ -том рабочем интервале технологического цикла БЗУ запишем в виде

$$[t_p]_i - [t_{TM}]_i = \Delta t_i < 0, \quad (1)$$

где  $[t_{TM}]_i$  – фактическое значение времени движения предмета обработки в  $i$ -том интервале цикла;  $\Delta t_i$  – абсолютное отклонение фактического значения времени движения от расчетного значения.

Переходя к относительным величинам, получим с учетом (1)

$$\delta t_i = \frac{\Delta t_i}{M[t_{TM}]_i} = \frac{[t_p]_i - [t_{TM}]_i}{M[t_{TM}]_i} < 0, \quad (2)$$

где  $M[t_{TM}]_i$  – математическое ожидание фактического значения времени движения предмета обработки.

Введем случайные относительные отклонения величин

$$[\bar{t}_{TM}]_i = \frac{[t_{TM}]_i - M[t_{TM}]_i}{M[t_{TM}]_i}; \quad [\bar{t}_p]_i = \frac{[t_p]_i - M[t_p]_i}{M[t_p]_i}; \quad (3)$$

и коэффициент запаса по времени движения предмета обработки  $(n_t)_i$

$$(n_t)_i = \frac{M[t_p]_i}{M[t_{TM}]_i}, \quad (4)$$

где  $M[t_p]_i$  – математическое ожидание расчетного значения времени движения предмета обработки.

С учетом выражений (3) и (4) условие возникновения параметрического отказа (2) можно записать в виде

$$\delta t_i = \{(n_t)_i - 1 + (n_t)_i [\bar{t}_p]_i - [\bar{t}_{TM}]_i\} < 0. \quad (5)$$

Для  $i > 1$  выражение (5) образует систему линейных уравнений, характеризующую условия возникновения параметрических отказов в любом из рабочих интервалов технологического цикла БЗУ в каком-либо захватывающем органе

$$\begin{cases} \delta t_1 = \{(n_t)_1 - 1 + (n_t)_1 [\bar{t}_p]_1 - [\bar{t}_{TM}]_1\} < 0; \\ \delta t_i = \{(n_t)_i - 1 + (n_t)_i [\bar{t}_p]_i - [\bar{t}_{TM}]_i\} < 0; \\ \delta t_k = \{(n_t)_k - 1 + (n_t)_k [\bar{t}_p]_k - [\bar{t}_{TM}]_k\} < 0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $k$  – число рабочих интервалов технологического цикла БЗУ.

На практике под воздействием многочисленных случайных факторов всегда имеет место разброс  $[t_p]_i - [t_{TM}]_i = \Delta t_i \neq 0$ , то есть  $\delta t_i \neq 0$ , поэтому отклонения можно считать подчиняющимися нормальному закону распределения, а решением системы (6) будет вероятность параметрического отказа

$$q_{t_i}(\delta t_i < 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\delta t_i)} \int_{-\infty}^0 \exp\left\{-\frac{[\delta t_i - M(\delta t_i)]^2}{2D(\delta t_i)}\right\} d(\delta t_i), \quad (7)$$

где  $D(\delta t_i)$  – дисперсия случайной величины  $\delta t_i$ ;  $M(\delta t_i)$  – математическое ожидание величины  $\delta t_i$ .

Будем полагать, что максимум плотности вероятности реализуется при расчетных значениях случайных величин, то есть для значений относительных отклонений  $[\bar{t}_p]_i = 0$ ;  $[\bar{t}_{TM}]_i = 0$ . Тогда  $\delta t_i = (n_t)_i - 1$ , а дисперсия случайной величины  $\delta t_i$

$$D(\delta t_i) = \left( \frac{1}{3} [\delta t_i - M(\delta t_i)]_{\max} \right)^2 = \frac{1}{9} \{ (n_t)_i [\bar{t}_p]_{\max} + [\bar{t}_{TM}]_{\max} \}^2, \quad (8)$$

где  $[\bar{t}_p]_{\max}$ ;  $[\bar{t}_{TM}]_{\max}$  – известные в рассматриваемых условиях максимальные разбросы относительных отклонений  $[\bar{t}_p]$ ;  $[\bar{t}_{TM}]$ , которые характеризуют соответственно точность расчетов конструктивных параметров БЗУ на этапе проектирования и размах случайных колебаний фактических значений данных параметров БЗУ в процессе его эксплуатации (например, частоты вращения диска с захватывающими органами, коэффициента трения предметов обработки и т.п.).

Введем новую переменную

$$x_i = \frac{\delta t_i - M(\delta t_i)}{D(\delta t_i)}. \quad (9)$$

С учетом выражений (8) и (9) из формулы (7) получим

$$q_{t_i}(\delta t_i < 0) = 0,5 - \Phi(y_i), \quad (10)$$

где

$$y_i = \frac{\delta t_i}{\sqrt{D(\delta t_i)}} = \frac{(n_t)_i - 1}{\sqrt{D(\delta t_i)}}, \quad (11)$$

$$\Phi(y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{y_i} e^{-\frac{x_i^2}{2}} dx_i \quad (12)$$

– табулированная функция Лапласа.

Вероятность появления параметрического отказа БЗУ из-за случайного выхода фактического значения времени движения предмета обработки за расчетное в каком-либо интервале технологического цикла БЗУ определим выражением

$$q_t = 1 - \prod_{i=1}^u \prod_{k=1}^k [1 - q_{t_i}(\delta t_i < 0)], \quad (13)$$

где  $u = \frac{\pi D}{h}$  – число захватывающих органов БЗУ;  $D$  – диаметр вращающегося диска БЗУ по оси захватывающих органов.

Если принять равновероятным появление параметрического отказа в любом интервале технологического цикла БЗУ и в любом захватывающем органе, то формулу (13) можно представить в виде

$$q_t = 1 - (1 - q_{t_i})^{uk}, \quad (14)$$

где  $q_{t_i}$  определяется выражениями (9) – (12).

Вероятность отсутствия параметрических отказов в течение технологического цикла механического дискового зубчатого БЗУ с учетом формулы (14) и того, что число рабочих интервалов технологического цикла  $k = 5$ , определим по выражению

$$p_t = (1 - q_t) = (1 - q_{t_i})^{5u}. \quad (15)$$

В таблице приведены расчетные значения вероятности  $q_{t_i}$  параметрического отказа в одном интервале кинематического цикла БЗУ, отнесенной к одному захватывающему органу ( $u = 1$ ;  $k = 1$ ).

**Вероятность  $q_{t_i}$  параметрического отказа в одном интервале кинематического цикла БЗУ, отнесенная к одному захватывающему органу**

$n_t$	$[\bar{t}_p]_{\max}$	$[\bar{t}_{TM}]_{\max}$		
		0,2	0,3	0,4
1,2	0,01	0,00230	0,02400	0,07210
	0,03	0,00550	0,03670	0,08380
	0,05	0,01050	0,04750	0,09680
1,3	0,01	< 0,00002	0,00200	0,01460
	0,03	< 0,00010	0,00400	0,02000
	0,05	0,00034	0,00680	0,02620
1,4	0,01	< 0,00001	0,00007	0,00190
	0,03	< 0,00001	0,00025	0,00340
	0,05	< 0,00001	0,00055	0,00540
1,5	0,01	< 0,00001	0,00001	0,00016
	0,03	< 0,00001	0,00003	0,00040
	0,05	< 0,00001	0,00003	0,00070

Анализ приведенных в таблице величин вероятностей параметрического отказа  $q_{t_i}$  для значений  $[\bar{t}_p]_{\max}$ ,  $[\bar{t}_{TM}]_{\max}$ ,  $n_t$ , наиболее возможных в практике проектирования механических дисковых БЗУ, позволяет рекомендовать

$$1,4 \leq n_t \leq 1,5 \text{ для } 0,03 \leq [\bar{t}_p]_{\max} \leq 0,05 \text{ при } 0,2 \leq [\bar{t}_{TM}]_{\max} \leq 0,4.$$

Прогнозируемая величина фактической производительности БЗУ на стадии проектирования с учетом вероятности возникновения параметрических отказов (15) определится выражением

$$[\Pi_{\phi}]_{\text{БЗУ}} = 60 \frac{v}{t} \eta_{\max} (1 - \varepsilon v^4) p_t.$$

Таким образом, на стадии проектирования БЗУ обеспечение требуемого уровня его надежности возможно за счет обоснованного выбора коэффициента запаса  $n_t$  по времени движения предметов обработки в рабочих интервалах технологического цикла БЗУ, который учитывает вероятностные законы рассеивания фактических значений конструктивных параметров БЗУ и физико-технических параметров загружаемых предметов обработки.

**Список литературы:** 1. Давыдова Е.В., Дружинина А.В., Прейс В.В. Математическая модель и оценка производительности механического зубчатого бункерного грузочного устройства с кольцевым ориентатором // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XVII междунар. научно-техн. конф., 14-19 сентября 2014 года, Севастополь. Донецк: ДонНТУ, 2014. С. (4). 2. Дружинина А.В., Прейс В.В. Экспериментальные исследования производительности дискового зубчатого бункерного грузочного устройства с кольцевым ориентатором // Производительность и надежность технологических систем в машиностроении: сб. науч. трудов междунар. научно-техн. конф., посвящ. 85-летию со дня рожд. д-ра техн. наук, проф. Волчкевича Л.И., 20-23 мая 2015 года, Москва; под науч. ред. В.В. Прейса и И.Л. Волчкевича. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 99-104. 3. Прейс В.В. Модели и оценка надежности роторных систем автоматической загрузки с параметрическими отказами // Автоматизация и современные технологии, 2003. № 1. С. 9-15.