

УДК 539.3

ПРОГРАММНЫЙ РАСЧЕТ РЕЖИМА НАГРУЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ФРИКЦИОННЫХ ДИСКОВ

д-р техн. наук В.Е. АНТОНЮК, канд. техн. наук А.С. СКОРОХОДОВ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);
д-р техн. наук проф. Э.М. ДЕЧКО
(Белорусский национальный технический университет, Минск);
В.В. РУДЫЙ
(Белорусский автомобильный завод, Минск)

Разработана и предлагается к использованию методика и программное обеспечение для расчета режимов нагружения фрикционных дисков. Предлагаемая методика и программное обеспечение опробованы при расчете режимов нагружения тормозных фрикционных дисков карьерных самосвалов БелАЗ. На основе выполненных расчетов режимов нагружения разработано техническое задание на проектирование специальной установки для динамической стабилизации тормозных фрикционных дисков с наружными диаметрами до 915 мм и максимальной толщиной дисков до 4 мм. Расчет работ с использованием разработанного программного обеспечения во много раз сокращает сроки и затраты на разработку технического задания на проектирование, позволяет на базе разработанного программного обеспечения для расчета режимов нагружения в сжатые сроки разработать программу управления исполнительными движениями установки с ЧПУ для динамической стабилизации фрикционных дисков.

Введение. Для устранения повышенного отклонения от плоскостности рабочих поверхностей фрикционных дисков создано оборудование для осуществления процесса динамической стабилизации [1]. Основные рекомендации по назначению режимов динамической стабилизации приведены в работах [2, 3], однако выполнение расчетов по реализации разработанных рекомендаций применительно к конкретным фрикционным дискам требуют значительных затрат времени.

С целью ускорения выполнения расчетов режимов нагружения разработано программное обеспечение расчета основных параметров режима нагружения, которое без особых изменений может использоваться как в выполнении расчетов нагружения конкретных фрикционных дисков, так и в разработке системы управления установкой с ЧПУ для динамической стабилизации фрикционных дисков. В настоящее время предлагаемое программное обеспечение использовано для назначения режимов нагружения фрикционных дисков с размерами наружного диаметра до 915 мм, которые используются в маслоохлаждаемых тормозах карьерных самосвалов большой грузоподъемности.

При назначении режимов динамической стабилизации для фрикционных дисков из конструкционных сталей используются следующие предпосылки:

- максимальное суммарное напряжение $\sigma_{рас}$, создаваемое в процессе нагружения, должно быть в диапазоне $(1,0 \dots 0,85)\sigma_T$ предела текучести для применяемого материала;
- суммарное число циклов нагружения рекомендуется в пределах 100...800;
- циклограмма нагружения окончательно уточняется по уровню накопления усталостных повреждений в зависимости от свойств материала диска.

В программу расчета режимов динамической стабилизации фрикционных дисков включены следующие расчеты:

- расчет силовых параметров процесса динамической стабилизации для выбора основных параметров установок;
- расчет возможной «тарельчатости» фрикционного диска для выбора оптимального количества нагружающих роликов;
- расчет допустимого уровня накопления усталостных повреждений.

Методика расчета силовых параметров базируется на схеме установки для динамических фрикционных дисков, показанной на рисунке 1. Расчетный фрикционный диск будет представлен в виде плоского кольца с размерами сечения: b – ширина сечения фрикционного диска во впадине зубьев; h – толщина кольца.

Расчетная максимальная деформация под роликом (прогиб) определим по формуле:

$$f_{\max} = \frac{\sigma_{рас} l^2 W_x}{12 E J_x}, \quad (1)$$

где $\sigma_{рас}$ – расчетное напряжение:

$$\sigma_{рас} = \frac{\sigma_T}{\kappa}.$$

Здесь σ_T – предел текучести материала фрикционного диска; κ – коэффициент, учитывающий совместное действие изгиба и кручения (для большинства фрикционных дисков рекомендуется предварительно принимать $\kappa = 1,1 \dots 1,3$).

Расчетная длина (l) при n -роликовой схеме нагружения:

$$l = \frac{\pi}{2n}(D_n + D_g),$$

где n – количество роликов в нижнем или верхнем ряду; D_n – наружный диаметр расчетного кольца для диска с внутренним зубчатым венцом или диаметр впадины зубьев для диска с наружным зубчатым венцом; D_g – внутренний диаметр расчетного кольца для диска с наружным зубчатым венцом или диаметр впадины зубьев для диска с внутренним зубчатым венцом.

Момент инерции сечения кольца (J_x) определим как

$$J_x = \frac{bh^3}{12}.$$

Момент сопротивления сечения кольца (W_x) найдем из выражения:

$$W_x = \frac{bh^2}{6}.$$

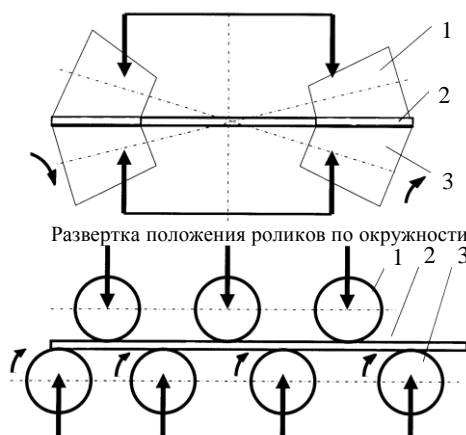


Рис. 1. Схема установки для динамической стабилизации фрикционного диска

Значение максимального прогиба уточняется и принимается окончательное значение f , по которому рассчитывается требуемое усилие нагружения ролика для достижения заданного прогиба. Усилие нагружения ролика для достижения заданного прогиба диска будет равно

$$P = \frac{48EJ_x}{l^3} f. \quad (2)$$

Соответственно, суммарная вертикальная сила перемещения верхних роликов

$$\Sigma P = P \cdot n. \quad (3)$$

Возникающее в диске напряжение изгиба

$$\sigma_u = \frac{Pl}{4W_x}. \quad (4)$$

Методика расчета «тарельчатости» фрикционного диска базируется на том, что опорные ролики, которые деформируют плоское кольцо, сходятся в радиальном направлении к центру кольца и при одинаковом прогибе плоского кольца возникнут различные напряжения на наружном и внутреннем диа-

метре кольца пропорционально расстоянию между опорами, что приводит к повороту этого сечения на угол «тарельчатости» β_{map} :

$$\beta_{map} = \frac{M_{map} l}{GJ_k}, \quad (5)$$

и к возникновению касательных напряжений на крайних точках, равных

$$\tau = \frac{M_{map}}{W_k}, \quad (6)$$

где J_k – момент инерции сечения кольца при кручении; W_k – момент сопротивления сечения кольца при кручении.

$$J_k = \frac{1}{3} \left(\frac{b}{h} - 0,63 \right) h^4;$$

$$W_k = \frac{1}{3} \left(\frac{b}{h} - 0,63 \right) h^3.$$

Методика расчета допустимого уровня накопления усталостных повреждений базируется на том, что нагружение детали циклической знакопеременной нагрузкой приводит к накоплению относительно небольших усталостных повреждений, которые приближенно могут быть определены используя гипотезу линейного суммирования повреждений:

$$\sum \sigma_i^m n_i = [a_{np}] \sigma_{-1}^m N_0, \quad (7)$$

где σ_i – значение напряжения динамической стабилизации при числе циклов действия напряжений n_i ; σ_{-1} – предел выносливости; N_0 – базовое число циклов нагружения; m – показатель уравнения кривой усталости; $[a_{np}]$ – значение допустимой доли использования ресурса работоспособности на осуществление динамической стабилизации.

В зависимости от материала деталей и технологии их изготовления используются различные варианты циклограмм со ступенчатым нагружением. В этом случае допустимая доля использования ресурса работоспособности определяется по зависимости:

$$a_{np} = \frac{\sum \sigma_{npi}^m n_{npi}}{\sigma_{-1}^m N_0}, \quad (8)$$

где σ_{npi} – значения приводимых напряжений реализуемых уровней нагружения при числах циклов их приложения n_{npi} .

Для осуществления процесса динамической стабилизации рекомендуется использовать два типа циклограмм, приведенных на рисунке 2.

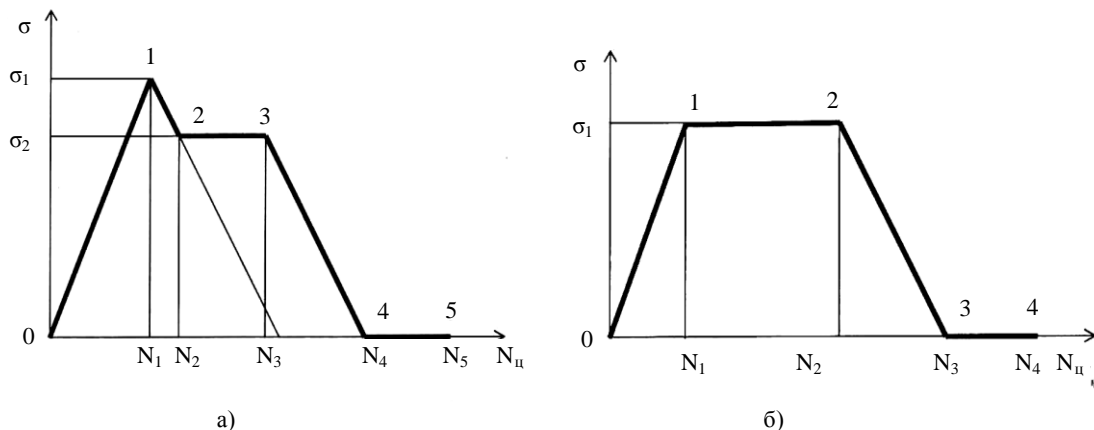


Рис. 2. Рекомендуемые типы циклограмм динамической стабилизации:
а – интенсивная; б – оптимальная

Расчет циклограммы начинается с назначения интенсивности роста напряжений на участках 0 – 1, определяемого коэффициентом K_p , и интенсивности падения напряжений соответственно на участках 1 – 2 и 3 – 4 для интенсивной циклограммы и на участке 2 – 3 для оптимальной циклограммы, определяемого коэффициентом K_{II} . Методика назначения коэффициентов K_p и K_{II} приведена в работах [4, 5].

После выбора коэффициентов K_p и K_{II} назначается расчетное напряжение $\sigma_{рас}$ по формуле (5) и производится расчет числа циклов нагружения на участках роста и падения напряжений. На участке постоянного напряжения число циклов нагружения уточняется по окончательному уровню накопления усталостных повреждений.

При использовании рекомендуемых на рисунке 2 двух типов циклограмм для расчета доли использования ресурса работоспособности на осуществление процесса динамической стабилизации требуется произвести расчет накопления усталостных повреждений для каждого участка циклограммы.

В таблице 1 приведены расчетные зависимости для расчета накопленных усталостных повреждений для интенсивного типа циклограммы (см. рис. 2, а). Для оптимального типа циклограммы выполняется аналогичный расчет.

Таблица 1

Расчет уровня накопления усталостных повреждений при использовании интенсивного типа циклограммы

Исходные параметры расчета		Точки циклограммы					
Номер точки на циклограмме		0	1	2	3	4	5
Расчетное напряжение $\sigma_{рас}$, МПа	$\sigma_{рас} = \frac{\sigma_T}{K}$	0	$\sigma_{рас}$	$0,95\sigma_{рас}$	$0,95\sigma_{рас}$	0	0
Расчетный прогиб, f , мм	$f_{max} = \frac{\sigma_{рас} l^2 W_x}{12 E J_x}$	0	f_{max}	$0,95f_{max}$	$0,95f_{max}$	0	0
Участки циклограммы		0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	
Принятое напряжение на участках циклограммы		$\sigma_1 = \sigma_{рас}$	$\sigma_2 = 0,95 \sigma_{рас}$	$\sigma_2 = 0,95 \sigma_{рас}$	0	0	
Расчетное количество циклов нагружения на каждом участке циклограммы		$N_1 = K_p \sigma_1$	$N_2 - N_1 = K_{II} \sigma_1 - \sigma_2$	$N_3 - N_2$	$N_4 - N_3 = K_{II} \sigma_2$	$N_5 - N_4$	
Расчетная формула уровня усталостных повреждений на каждом участке циклограммы $\sigma_{npi}^m n_{npi}$		$\frac{\sigma_1^m N_1}{m+1}$	$\frac{\sigma_1^m (K_{II} \sigma_1) - \sigma_2 K_{II} \sigma_2}{m+1}$	$\sigma_2^m N_3 - N_2$	$\frac{\sigma_2^m N_4 - N_3}{m+1}$	0	
Суммарный уровень усталостных повреждений на всех участках циклограммы		$\sum \sigma_{npi}^m n_{npi}$					
Общий ресурс		$\sigma_{-1}^m N_0$					
Доля использования ресурса на выполнение процесса динамической стабилизации		$a_{np} = \frac{\sum \sigma_{npi}^m n_{npi}}{\sigma_{-1}^m N_0}$					

Программное обеспечение DISK расчета режимов нагружения разработано для комплексного выполнения всех стадий расчетов режима нагружения динамической стабилизации фрикционных дисков или деталей типа колец с учетом заданных циклограмм нагружения, характеристик материала, параметров фрикционных дисков и допустимого уровня накопления повреждений.

Исходная информация, которая используется при разработке программного обеспечения режимов динамической стабилизации, приведена в таблице 2.

Программное обеспечение расчетной методики расчета режимов динамической стабилизации фрикционных дисков написано на языке Visual Basic. Главное окно программы приведено на рисунке 3.

Ввод исходных данных основного расчета осуществляется подпрограммой Def_Main_1 после процедуры описания всех переменных и организован в Visual Basic с помощью инструмента Text Box. После ввода оператором исходных данных текстовый материал преобразуется функцией Number(text) в числовые значения. Далее оператор нажимает командную кнопку «Расчет», и программа выполняет расчет основных и промежуточных показателей. Расчет выполняется подпрограммой Sub Raschet_1, присвоение значений переменным и вывод результатов – подпрограммой Sub Def_Res_1.

Затем оператор вводит данные для расчета доли использованного ресурса, а также значение количества участков циклограммы нагружения. После нажатия командной кнопки «Циклограмма» программа генерирует таблицу для ввода остальных данных. Формирование таблицы осуществляется подпрограммой Command3_Click.

Таблица 2

Исходная информация для разработки программного обеспечения расчета режимов нагружения при динамической стабилизации фрикционных дисков

Параметры	Обозначение	Размерность
Исходные данные фрикционного диска		
Наименование диска		
Материал диска		
Поверхностная твердость диска	HRC, HB	
Наружный диаметр кольца	D_n	мм
Внутренний диаметр кольца	$D_в$	мм
Толщина поперечного сечения кольца	h	мм
Предел прочности	σ_b	МПа
Предел текучести	σ_T	МПа
Предел усталости	σ_{-1}	МПа
Показатель уравнения кривой усталости	m	
Базовое число циклов нагружения	N_0	
Модуль упругости	E	МПа
Модуль сдвига	G	МПа
Число роликов	n	
Расчет силовых параметров		
Ширина поперечного сечения кольца	b	мм
Расчетная длина	l	мм
Момент инерции сечения кольца (диска)	J_x	мм ⁴
Момент сопротивления сечения кольца (диска)	W_x	мм ³
Деформация максимальная под роликом	f_{max}	мм
Расчетное напряжение динамической стабилизации	$\sigma_{рас}$	МПа
Принятое значение деформации под роликом	f	мм
Вертикальная сила, действующая на один ролик	P	Н
Суммарная вертикальная сила перемещения верхних роликов	ΣP	Н
Напряжение изгиба	σ_u	МПа
Дополнительное усилие	Q	Н
Момент, вызывающий «тарельчатость» диска	$M_{тар}$	Н·мм
Угол «тарельчатости»	$\beta_{тар}$	рад
Напряжение кручения	τ	МПа
Суммарное напряжение	$\sigma_{сум}$	МПа
Расчет допустимого уровня накопления усталостных повреждений		
Доля использования ресурса	a_p	

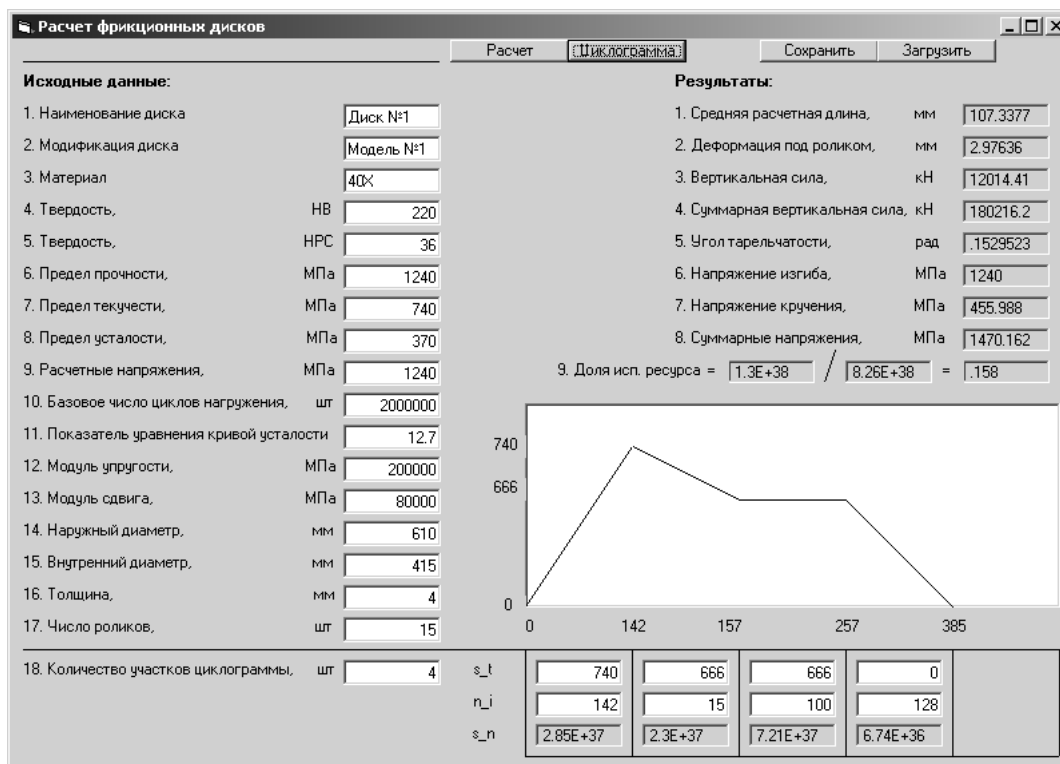


Рис. 3. Окно расчета режимов динамической стабилизации фрикционных дисков

В таблице 3 приведены результаты расчета режимов нагружения фрикционных дисков маслоохлаждаемых тормозов карьерных самосвалов семейства БелАЗ.

Таблица 3

Расчетные зависимости динамической стабилизации фрикционных дисков при 15-роликовой схеме нагружения

Диск	Состояние диска*	Размеры, мм			b, мм	f, мм	P, Н	ΣP, Н
		D _н	D _в	h				
75570-1711482	1	481	396,5	4	4,22	2,2	6080	91270
	2	470	398	3,4	3,6	2,5	3790	56800
	3	470	398	3	3,6	2,8	2950	44220
75570-1711484	1	463,5	384	4	3,97	2,0	5930	88910
	2	462	395	3,4	3,35	2,4	3570	53530
	3	462	395	3	3,35	2,8	2780	41680
7555B-3502595-10	1	610	415	4	9,75	3,0	12020	180300
	2	588,5	420	3,4	8,42	3,4	7620	114410
	3	588,5	420	3	8,42	3,8	5930	89070
7555B-3502554-10	1	590	392	4	9,90	2,7	12730	191090
	2	585	414	3,4	8,55	3,3	7810	117210
	3	585	414	3	8,55	3,8	6080	91250
75570-3502595	1	910	675	4	11,75	7,1	9360	140520
	2	887,5	680	3,4	10,37	8,2	6040	90640
	3	887,5	680	3	10,37	9,3	4700	70570
75570-3502554	1	890	647	4	12,15	6,7	9980	149840
	2	885	667,5	3,4	10,87	8,0	6390	95930
	3	885	667,5	3	10,87	9,1	4970	74680

Примечание. Состояние диска*: 1 – правка после вырезки заготовки диска толщиной 4 мм; 2 – правка диска после предварительного шлифования; 3 – правка окончательно обработанного диска.

Заключение

Разработана и предлагается к использованию для расчета режимов нагружения фрикционных дисков методика и программное обеспечение на базе ПК. Предлагаемая методика и программное обеспечение опробованы при расчете режимов нагружения тормозных фрикционных дисков карьерных самосвалов БелАЗ. На основе выполненных расчетов режимов нагружения разработано техническое задание на проектирование специальной установки для динамической стабилизации тормозных фрикционных дисков с наружными диаметрами до 915 мм и максимальной толщиной дисков до 4 мм.

Результаты расчета позволили:

- выбрать оптимальное соотношение числа нагружающих роликов n для достижения минимальной «тарельчатости»;
- рассчитать основные силовые характеристики установки для динамической стабилизации;
- учесть рассеяние механических характеристик материалов фрикционных дисков;
- рассчитать различные варианты интенсивных и оптимальных типов циклограмм для динамической стабилизации фрикционных дисков на различных операциях технологического процесса их изготовления.

В целом выполненный объем расчетных работ с использованием разработанного программного обеспечения во много раз сократил сроки и затраты на разработку технического задания на проектирование установки для динамической стабилизации фрикционных дисков и позволил на базе разработанного программного обеспечения для расчета режимов нагружения в сжатые сроки разработать программу управления исполнительными движениями установки с ЧПУ для динамической стабилизации фрикционных дисков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонюк, В.Е. Технологические возможности повышения точности изготовления деталей типа плоских колец / В.Е. Антонюк // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 8. – С. 16 – 20.
2. Антонюк, В.Е. Основные положения динамической стабилизации геометрических форм деталей / В.Е. Антонюк, О.В. Берестнев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2005. – Т. 49, № 3. – С. 98 – 102.
3. Антонюк, В.Е. Повышение качества изготовления деталей динамической стабилизацией колец / В.Е. Антонюк // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. – № 3. – С. 65 – 71.
4. Антонюк, В.Е. Методические основы динамической стабилизации колец / В.Е. Антонюк // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2005. – № 4. – С. 29 – 32.
5. Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация геометрических параметров деталей циклическим нагружением колец / В.Е. Антонюк // Материалы, технологии, инструменты. – 2004. – № 3, Т. 9. – С. 82 – 87.

Поступила 21.11.2008