

УДК (UDC) 625.76.08

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОМЕНТА
СОПРОТИВЛЕНИЯ НА РАБОЧЕМ ОРГАНЕ ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫMETHOD FOR CALCULATING THE SPECTRAL DENSITY OF THE MOMENT
RESISTANCE ON THE WORKING BODY OF THE ROAD MILL MACHINE

Фомин К.В.

Fomin K.V.

Тверской государственный технический университет (Тверь, Россия)
Tver State Technical University (Tver, Russian Federation)

Аннотация. Дорожные фрезы различных типов нашли широкое применение при строительстве и ремонте дорог. В процессе эксплуатации в элементах их привода и конструкции возникают значительные динамические нагрузки, что приводит к ухудшению показателей надежности и снижению их технико-экономических характеристик. Повышение надежности и эффективности работы фрезерующих агрегатов является актуальной проблемой, решение которой связано с возможностью прогнозирования характера и величины действующих нагрузок в элементах конструкции. Основным их источником является рабочий орган. При этом силы внешнего сопротивления носят резко переменный, случайный характер. В статье представлена методика расчета спектральной плотности и дисперсии момента на стадии проектирования. Она учитывает периодический характер взаимодействия резцов с дорожным покрытием, а так же случайные условия и режимы работы фрезерующего агрегата. Рассмотрено определение исходных данных необходимых для проведения расчета. Дан анализ полученных выражений, исследованы основные особенности нагрузок на рабочем органе. Полученные характеристики являются исходной информацией для выполнения динамического анализа элементов привода и конструкции дорожной фрезы, проведения прочностных расчетов и выбора их оптимальных параметров.

Ключевые слова: дорожная фреза, фрезерный барабан, методика расчета, момент сопротивления, спектральная плотность.

Дата принятия к публикации: 07.12.2020

Дата публикации: 25.12.2020

Сведения об авторе:

Фомин Константин Владимирович - доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механизация природообустройства и ремонт машин», ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», e-mail: fomin_tver@mail.ru.

ORCID:000-0002-8153-1115

Abstract. Milling units are widely used in the construction and repair of roads. They guarantee high quality of work, have high productivity and make it possible to provide comprehensive mechanization of technological operations. During operation, significant dynamic loads occur in the drive elements and the design of the units, which leads to a deterioration in reliability indicators and a decrease in the technical and economic characteristics of their operation. Improving the reliability and efficiency of milling units is an problem, the solution of which is associated with the opportunity to predict the character and magnitude of the operating loads in the structural elements. The main source of these loads is the working body. At the same time, the forces of external resistance that arise during operation are sharply variable, random in nature. The article presents a method for calculating the spectral density and moment dispersion at the design stage. It takes into consideration the periodic character of the interaction of the cutters with the road surface, as well as random conditions and modes of operation of the milling unit. The article focuses on determining the initial data required for the calculation. The obtained expressions are analyzed and the main characteristic features of the mill loads are considered. The considered characteristics are the initial data for the dynamic analysis of the drive elements and the unit structure, as well as for strength calculations.

Keywords: road mill machine, milling drum, method of calculation, moment of resistance, spectral density of moments.

Date of acceptance for publication: 07.12.2020

Date of publication: 25.12.2020

Author's information:

Konstantin V. Fomin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Department «Mechanization of environmental and repair machines», Tver State Technical University, e-mail: fomin_tver@mail.ru.

ORCID:0000-0002-8153-1115

1. Введение

При строительстве и ремонте дорог широкое применение нашли дорожные фрезы различных типов. Их используют для удаления дорожного полотна, локальных неровностей, создания шероховатых поверхностей, корректировки профиля дороги и при многих других технологических операциях [1, 2]. Фрезерующие агрегаты гарантируют высокое качество работ, большую производительность и дают возможность обеспечить их комплексную механизацию [3, 4].

При этом применяются различные типы рабочих органов [3-5]: грубые и стандартные, точные и сверхточные. Они отличаются конструкцией, шириной захвата, режимами работы, схемой расстановки ножей, их количеством [3-5]. Фрезы снабжены нивелирующими устройствами, обеспечивающими заданную глубину фрезерования и продольный уклон [3-5].

В процессе эксплуатации в элементах привода и конструкции агрегатов возникают значительные динамические нагрузки, что приводит к ухудшению показателей надежности и снижению их технико-экономических характеристик [6, 7]. Основным источником этих нагрузок является рабочий орган. При этом силы внешнего сопротивления, возникающие при работе, носят резко переменный, случайный характер. Он обусловлен периодическим взаимодействием ножей с дорожным полотном и случайными свойствами условий работы.

Существенное влияние на их формирование оказывают тип технологической операции, состояние дорожного полотна, ее профиль, структурная неоднородность обрабатываемого материала наличие дефектов, изменчивость глубины фрезерования, физико-механические свойства асфальтобетона и их вероятностные характеристики.

Характер нагружения зависит от конструкции фрезерного барабана его параметров и режимов работы, системы управления дорожной фрезой, износа ножей [5-7], а также колебаний, возбуждаемых силами резания и дисбалансом фрезы.

Повышение надежности и эффективности работы фрезерующих агрегатов является актуальной проблемой, решение которой связано с возможностью прогнозирования характера и величины действующих нагрузок на фрезу и в элементах конструкции на стадиях проектирования.

2. Постановка задачи

Целью статьи является разработка методики расчета вероятностных характеристик момента на рабочем органе дорожной фрезы. Она должна учитывать специфические особенности формирования нагрузки при взаимодействии с дорожным полотном, которые заключаются в периодическом характере взаимодействия резцов с обрабатываемым материалом, а так же случайные свойства его прочностных характеристик, глубины фрезерования и режимов работы.

3. Материалы и методы исследования

Рассмотрим рабочий орган дорожной фрезы, имеющий несколько участков, отличающихся числом плоскостей резания, радиусом расположения режущих элементов, числом ножей в плоскости резания и глубиной фрезерования. Разная глубина фрезерования для различных участков фрезы может быть связана с наклоном рабочего органа относительно горизонта. Наклон создается специальным нивелирующим устройством для обеспечения необходимого профиля дорожного полотна. В каждой плоскости резцы расположены равномерно.

При существующих режимах работы дорожных фрез можно считать, что число оборотов рабочего органа и скорость агрегата, физико-механические свойства дорожного полотна и глубина фрезерования, изменяются достаточно плавно на протяжении нескольких подач на нож, оставаясь примерно постоянными в пределах подачи.

Учитывая случайный характер формирования силовых факторов на режущих элементах фрезы для решения поставленной задачи необходимо использование методов теории вероятности и статистической динамики [8,

9]. В соответствии с ними при решении задач динамического анализа и определении показателей надежности механических систем необходимо знать вероятностные характеристики внешних воздействий, такие как дисперсия и спектральная плотность.

Спектральная плотность момента на фрезерном барабане при выполнении технологической операции с учетом моментов на отдельных участках равна [8, 10]:

$$\begin{aligned}
 S_i(\omega) = & \frac{2}{T_i} \left[\frac{M_i}{2} \sum_{q=1}^Q \Psi_{1Mqi}(\omega) D_q - \frac{M_i}{2} \sum_{q=1}^Q \Psi_{2Mqi}(\omega) D_q + \right. \\
 & + \sum_{q < s} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_i} \Psi_{3Mqsiml}(\omega) K_{qsiml} + 2 \sum_{q < s} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_i} \sum_{p=1}^{\infty} \Psi_{4Mqsimlp}(\omega) K_{qsimlp} + \\
 & \left. + \sum_{r=-\infty}^{\infty} \left(F_{Mli} \left(\frac{2\pi r}{\varphi_{Ti}}; m_q \right) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_{M2i} \left(\frac{2\pi r}{\varphi_{Ti}}; P_{qi} \right)}{\partial P_{qi}^2} \right] D_q \right) \times \right. \\
 & \left. \times \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_i} \exp \left(-j \frac{2\pi r}{\varphi_{Ti}} (\varphi_{im} - \varphi_{il}) \right) \frac{\omega \varphi_{Ti}}{2\pi r^2} W \left(\frac{\omega \varphi_{Ti}}{2\pi r} \right) \right]; \quad r \neq 0, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где T_i – период повторности импульсов, возникающих на резцах в одиночной плоскости резания i -го участка

$$T_i = \frac{\varphi_{Ti}}{\int_{-\infty}^{\infty} \omega_{\phi} W(\omega_{\phi}) d\omega_{\phi}};$$

φ_{Ti} – угол между ножами в плоскости резания; ω_{ϕ} – угловая скорость вращения фрезы; $W(\omega_{\phi})$ – плотность распределения угловой скорости фрезы; M_i – число плоскостей резания на i -м участке; Q – число параметров

$$S(\omega) = \sum_{i=1}^I S_i(\omega) + \sum_{i \neq k}^I \sum_k S_{ik}(\omega),$$

где I – число участков на рабочем органе; $S_i(\omega)$, $S_{ik}(\omega)$ – соответственно, спектральные и взаимные спектральные плотности моментов на участках фрезы.

Для $S_i(\omega)$ момента при фрезеровании дорожного полотна можно записать [10]:

импульса; D_q – дисперсия параметров; K_{qsimlp} , K_{qsiml} – коэффициенты корреляции и взаимной корреляции параметров в направлении движения дорожной фрезы и перпендикулярном ему; m_q – математическое ожидание параметров; P_{qi} – q -й параметр импульса для i -го участка; φ_{im} – углы между началом отсчета и резцами в m -й плоскости резания на i -м участке.

В выражении (1) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 \Psi_{1Mqi}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial^2 F_{M1i}(\omega; \omega_{\phi}; P_{qi})}{\partial P_{qi}^2} \right] W(\omega_{\phi}) d\omega_{\phi}; \\
 \Psi_{2Mqi}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial^2 F_{M2i}(\omega; \omega_{\phi}; P_{qi}; P_{si})}{\partial P_{q(s)i}^2} \right] W(\omega_{\phi}) d\omega_{\phi}; \\
 \Psi_{3Mqsiml}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial^2 F_{M2i}(\omega; \omega_{\phi}; P_{qi}; P_{si})}{\partial P_{qi} \partial P_{si}} \right] \exp \left(-j \frac{\omega}{\omega_{\phi}} (\varphi_{im} - \varphi_{il}) \right) W(\omega_{\phi}) d\omega_{\phi};
 \end{aligned}$$

$$\Psi_{4Mqsimlp}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial^2 F_{M2i}(\omega; \omega_\phi; P_{qi}; P_{si})}{\partial P_{qi} \partial P_{si}} \right]_m \exp\left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{im} - \varphi_{il})\right) \cos\left(\frac{\omega}{\omega_\phi} P \varphi_{Ti}\right) W(\omega_\phi) d\omega_\phi,$$

где

$$F_{M1i}(\omega; \omega_\phi; P_{qi}) = |S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{qi})|^2;$$

$$F_{M2i}(\omega; \omega_\phi; P_{qi}; P_{si}) = S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{qi}) S_{0i}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{si}).$$

Знак * обозначает комплексно-сопряженную величину.

Спектр функции $S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{qi})$ момента сопротивления в пределах угла контакта резца с обрабатываемым материалом:

$$S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{qi}) = \int_0^{\varphi_{ti}/\omega_\phi} M_{0i}(\omega_\phi t; P_{qi}) \exp(-j\omega t) dt,$$

где φ_{ti} – угол контакта ножа с дорожным полотном для i -го участка

$$\varphi_{ti} = \arccos \frac{R_{\phi i} - H_{\phi i}}{R_{\phi i}} + \arcsin \frac{c_i}{2R_{\phi i}}; \quad (2)$$

$R_{\phi i}$, $H_{\phi i}$, c_i – радиус расположения режущих элементов, глубина фрезерования и подача на нож для i -го участка [7, 12]

$$c_i = W \frac{2\pi}{z_i \omega_\phi};$$

z_i – число резцов в плоскости резания i -го участка; $M_{0i}(t; P_{imn})$ – изменение момента на ноже.

Взаимные спектральные плотности моментов формируемых на i -ом и k -ом участках фрезы могут быть определены с помощью методики представленной в [11]:

$$S_{ik}(\omega) = \frac{2}{T} \left[\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_k} \sum_{q<s} \Psi_{1ikml}(\omega) K_{qsikml} + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{P}{2N+1}\right) \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_k} \sum_{q<s} \Psi_{2ikml}(\omega) K_{qsikmlp} + \sum_{r=-\infty}^{\infty} \left(G_{2ik}(r; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 G_{2ik}(r; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right) \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_k} \exp[-jr(\varphi_{im} - \varphi_{kl})] \frac{\omega}{r^2} W\left(\frac{\omega}{r}\right) \right], \quad r \neq 0;$$

$$S_{ki}(\omega) = \frac{2}{T} \left[\sum_{m=1}^{M_k} \sum_{l=1}^{M_i} \sum_{q<s} \Psi_{1kiml}(\omega) K_{qskiml} + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{P}{2N+1}\right) \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{l=1}^{M_i} \sum_{q<s} \Psi_{2kimlp}(\omega) K_{qskimlp} + \sum_{r=-\infty}^{\infty} \left(G_{2ki}(r; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 G_{2ki}(r; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right) \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{l=1}^{M_i} \exp[-jr(\varphi_{km} - \varphi_{il})] \frac{\omega}{r^2} W\left(\frac{\omega}{r}\right) \right], \quad r \neq 0, \quad (3)$$

где T – время соответствующее одному обороту фрезы

$$T = \frac{2\pi}{\int_{-\infty}^{\infty} \omega_\phi W(\omega_\phi) d\omega_\phi};$$

M_k – число плоскостей резания на k -м участке; K_{qsikml} , $K_{qsikmlp}$, K_{qskiml} , $K_{qskimlp}$ – коэффициенты корреляции параметров для i -го и k -го участков на m -й и l -й плоскости резания;

$$\Psi_{1ikml}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial^2 G_{1ik}(\omega; \omega_\phi; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{im} - \varphi_{kl}) \right] W(\omega_\phi) d\omega_\phi;$$

$$\Psi_{2ikmlp}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial^2 G_{2ikp}(\omega; \omega_\phi; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{im} - \varphi_{kl}) \right] \cos \left(\frac{\omega}{\omega_\phi} 2\pi p \right) W(\omega_\phi) d\omega_\phi;$$

$$\Psi_{1kiml}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial^2 G_{1ki}(\omega; \omega_\phi; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{km} - \varphi_{il}) \right] W(\omega_\phi) d\omega_\phi;$$

$$\Psi_{2kimlp}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial^2 G_{2kip}(\omega; \omega_\phi; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{km} - \varphi_{il}) \right] \cos \left(\frac{\omega}{\omega_\phi} 2\pi p \right) W(\omega_\phi) d\omega_\phi,$$

где

$$G_{1ik}(j\omega; \omega_\phi; P) = S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{im}) S_{0k}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{kl}) \sum_{\nu=0}^{L_i-1} \sum_{\mu=0}^{L_k-1} \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\nu\varphi_{Ti} - \mu\varphi_{Tk}) \right];$$

$$G_{2ikp}(j\omega; \omega_\phi; P) = S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{im}) S_{0k}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{kl;n-p}) \sum_{\nu=0}^{L_i-1} \sum_{\mu=0}^{L_k-1} \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\nu\varphi_{Ti} - \mu\varphi_{Tk}) \right];$$

$$G_{1ki}(j\omega; \omega_\phi; P) = S_{0k}(j\omega; \omega_\phi; P_{km}) S_{0i}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{il}) \sum_{\nu=0}^{L_k-1} \sum_{\mu=0}^{L_i-1} \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\nu\varphi_{Tk} - \mu\varphi_{Ti}) \right];$$

$$G_{2kip}(j\omega; \omega_\phi; P) = S_{0k}(j\omega; \omega_\phi; P_{km}) S_{0i}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{il;n-p}) \sum_{\nu=0}^{L_k-1} \sum_{\mu=0}^{L_i-1} \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\nu\varphi_{Tk} - \mu\varphi_{Ti}) \right],$$

где $S_{0k}(j\omega; \omega_\phi; P_{km})$, P_{km} , φ_{Tk} – соответственно, спектр момента сопротивления при одиночном акте воздействия, параметры и угол между резами в m -й плоскости резания k -го участка; φ_{km} – углы между началом координат и ножами в m -й плоскости для k -го участка; φ_{Tk} – угол контакта резца с дорожным полотном для k -го участка; L_k , L_i – соответственно, число резцов в плоскости резания для k -го и i -го участков.

Дисперсия момента равна [8]:

$$D = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega.$$

С учетом четности и при сохранении полной энергии сигнала в расчетной практике широкое применение нашло понятие одностороннего «физического» спектра [8, 9]

$$S^+(\omega) = 2S(\omega).$$

Выражения (1) и (3) отображают связь спектральной и взаимной спектральной

плотностей момента с вероятностными характеристиками параметров импульсов.

4. Определение исходных данных для расчета

Спектральные и взаимные спектральные плотности в значительной степени определяется преобразованием Фурье функции, описывающей момент на резце в пределах дуги контакта в зависимости от угла поворота фрезы при взаимодействии с дорожным полотном.

Для его определения могут быть использованы понятия коэффициента резания или удельной энергии на фрезерование [12, 13].

При фрезеровании общие затраты энергии складываются из энергии идущей на деформацию и разрушение асфальтобетона и сообщение материалу скорости [12]. В этом случае для момента сопротивления на ноже можно записать:

$$M_{oi}(\varphi; P_{qi}) = R_{\phi_i} b_i \delta_i(\varphi) \left[K_p + k_{om} \frac{\gamma V_{pi}^2}{2 \cdot 10^3} \right] \quad \text{при } \varphi \leq \varphi_{\tau i};$$

$$M_{oi}(\varphi; P_{qi}) = 0 \quad \text{при } \varphi > \varphi_{\tau i},$$

где b_i – средняя ширина слоя материала срезаемого ножом (может зависеть от угла поворота фрезы); $\delta_i(\varphi)$ – функция изменения толщины стружки для резцов i -го участка; $\varphi = \omega_{\phi} t$ – угол поворота фрезы; K_p – удельное сопротивление резанию, кПа; k_{om} – коэффициент отбрасывания ($k_{om} \approx 0,75$) [12]; γ – плотность асфальтобетона, кг/м³; V_{pi} – скорость резания для рассматриваемого участка (при встречном фрезеровании) [7, 12]

$$V_{pi} = \sqrt{W^2 + 2WV_{oi} \cos(\omega_{\phi} t - \varphi_{oi}) + V_{oi}^2},$$

где W – скорость движения фрезерующего агрегата; $V_{oi} = R_{\phi_i} \omega_{\phi}$ – окружная скорость режущего элемента на i -м участке фрезы; φ_{oi} – угол между вертикалью и линией, проведенной к вершине «гребешка» $\varphi_{oi} = \arcsin(c_i/2R_{\phi_i})$.

$$M_{oi}(t; P_{qi}) = R_{\phi_i} b_i c_i \left[C_{cu} k_{mp} + k_{om} \frac{\gamma V_{pi}^2}{2 \cdot 10^3} \right] \sin \omega_{\phi} t \quad \text{при } \varphi \leq \varphi_{\tau i}; \quad (4)$$

$$M_{oi}(t; P_{qi}) = 0 \quad \text{при } \varphi > \varphi_{\tau i}.$$

Преобразование Фурье выражения (4) имеет вид:

$$S_{oi}(j\omega; \omega_{\phi}; P_{qi}) = \frac{1}{2j} R_{\phi_i} b_i c_i \left[C_{cu} k_{mp} + k_{om} \frac{\gamma V_{pi}^2}{2 \cdot 10^3} \right] \left[U(\omega - \omega_{\phi}; \omega_{\phi}) - U(\omega + \omega_{\phi}; \omega_{\phi}) \right],$$

где

$$U(\omega; \omega_{\phi}) = \frac{2}{\omega} \sin \frac{\omega \varphi_{\tau i}}{2\omega_{\phi}} \exp\left(-j \frac{\omega \varphi_{\tau i}}{2\omega_{\phi}}\right).$$

Из выражений (2) и (4) видно, что кроме режимов работы и конструктивных параметров фрезерующего агрегата на формирование момента сопротивления оказывают влияние сцепление C_{cu} , плотность γ фрезеруемого материала и глубина фрезерования H_{ϕ_i} . Эти три параметра импульсов являются случайными. Структурное сцепление, плотность и их вероятностные характеристики зависят от физико-механических свойств дорожного полотна его структуры, износа, на-

Для встречного фрезерования при $V_{oi} \ll W$ форма траектории ножа в пределах дуги контакта с дорожным полотном мало отличается от окружности радиусом R_{ϕ_i} . В этом случае для изменения толщины стружки в любой точке контакта можно записать [12] $\delta_i(t) = c_i \sin \omega_{\phi} t$.

Учитывая связь удельного сопротивления резанию со структурным сцеплением фрезеруемого материала C_{cu} , кПа [13]

$$K_p = C_{cu} k_{mp},$$

где k_{mp} – коэффициент, зависящий от внутреннего трения и конструкции режущего элемента [13], для $M_{oi}(t; P_{imn})$ получим:

личия дефектов и других факторов. Изменчивость глубины фрезерования определяется состоянием дорожного полотна, ее профилем, наличием дефектов, схемой подвески рабочего органа, конструкцией фрезерного барабана, его параметрами и режимами работы, параметрами и типом автоматической системы управления глубиной фрезерования дорожной фрезы [3-5].

Значения этих параметров можно представить как функцию двух переменных:

$$P_{qi} = P_{qi}(x, y),$$

где $P_{qi} = \{C_{cu}, \gamma, H_{\phi}\}$; x и y – координаты точки для соответствующих параметров.

В случае однородности и большого числа статистически независимых условий, формирующих изменчивость физико-механических

$$K_{P_{qxy}}(\Delta x; \Delta y) = m_1 \left\{ \left[P_{qi}(x, y) - m_{qi} \right] \left[P_{qi}(x + \Delta x, y + \Delta y) - m_{qi} \right] \right\},$$

где $m_1 \{ \}$ – знак усреднения; m_{qi} – математическое ожидание q -го параметра. Аналогично можно ввести двумерные корреляци-

$$K_{P_{qxy}}(\Delta x; \Delta y) = m_1 \left\{ \left[P_{qi}(x, y) - m_{qi} \right] \left[P_{si}(x + \Delta x, y + \Delta y) - m_{si} \right] \right\},$$

где $P_{qi}(x, y)$, $P_{si}(x, y)$ – величины соответствующие q -му и s -му параметрам; m_{qi} , m_{si} – математические ожидания q -го и s -го параметров.

С учетом стационарных свойств случайных параметров, значения коэффициентов корреляции K_{qsiml} в направлении перпендикулярном движению агрегата определяются величинами корреляционных функций условий работы (изменчивость прочностных свойств материала, его плотности и глубины фрезерования) в периодические моменты взаимодействия режущих элементов i -го участка с дорожным полотном. С учетом плавности изменения параметров в пределах нескольких подач они могут быть записаны следующим образом:

$$K_{qsiml} = K_{P_{qsiy}}[(m-l)h],$$

где m, l – номера соответствующих плоскостей резания i -го участка фрезы; $K_{P_{qsiy}}(y)$ – корреляционные и взаимно корреляционные функции случайных параметров в направлении перпендикулярном движению дорожной фрезы; h – расстояние между плоскостями резания.

Для коэффициентов корреляции параметров с учетом их изменения в направлении движения дорожной фрезы и перпендикулярно ему имеем:

$$K_{qsimlp} = K_{P_{qsiy}}[c_i p; (m-l)h].$$

ких свойств дорожного полотна, глубины фрезерования и независимости их вероятностных характеристик от выбора начала координат, эту функцию можно рассматривать как случайную, стационарную, эргодическую с двумерной корреляционной функцией:

онные функции для разнородных параметров (например, между структурным сцеплением и плотностью):

В случае если возможно разделение коэффициентов корреляции, для C_{cu}, γ и H_{ϕ} в направлении движения дорожной фрезы и перпендикулярном ему, можно записать:

$$K_{qsimlp} = K_{P_{qsix}}(c_i p) K_{P_{qsiy}}[(m-l)h],$$

где $K_{P_{qsix}}(c_i p)$ – корреляционные и взаимно корреляционные функции случайных параметров в направлении в направлении движения агрегата.

5. Результаты и их анализ

В качестве примера расчета рассмотрим рабочий орган, имеющий один участок. Его ширина составляет 0,5 м. Диаметр фрезы равен 0,7 м. Средняя глубина фрезерования принята 0,1 м. Число плоскостей резания – 34. В плоскости резания находится два резца. Шаг установки ножей – 15 мм. На рис.1 показана схема расположения ножей.

Скорость передвижения дорожной фрезы 0,4 м/с. Фрезерный барабан имеет угловую скорость 12 с⁻¹. Плотность распределения угловой скорости принята нормальной с коэффициентом вариации 3%.

Коэффициенты вариации структурного сцепления, плотности асфальта и глубины фрезерования приняты равными 6%. Средние значения сцепления $C_{cu} = 0,9$ МПа [14, 15] и плотности $\gamma = 2470$ кг/м³ [14, 15].

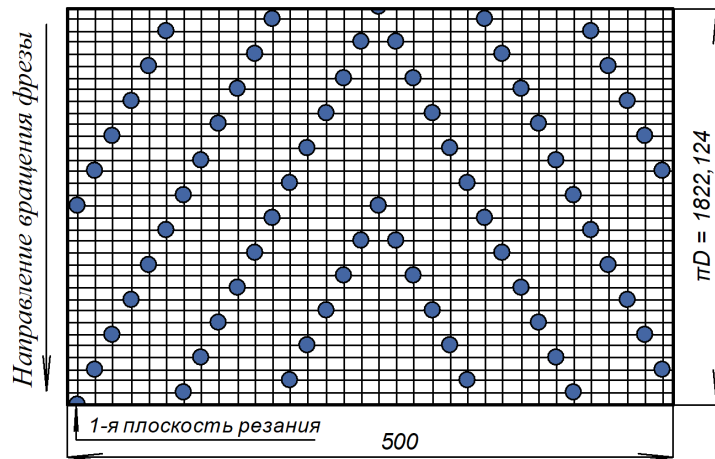


Рис.1. Схема развертки корпуса фрезы

В результате расчета получены значения математического ожидания момента 6,01 кНм и среднеквадратического отклонения 0,655 кНм (коэффициент вариации – 10,8%). Нормированная спектральная плотность момента сопротивления представлена на рис. 2.

Выражения (1 и 3) позволяют выделить некоторые свойства момента на рабочем органе.

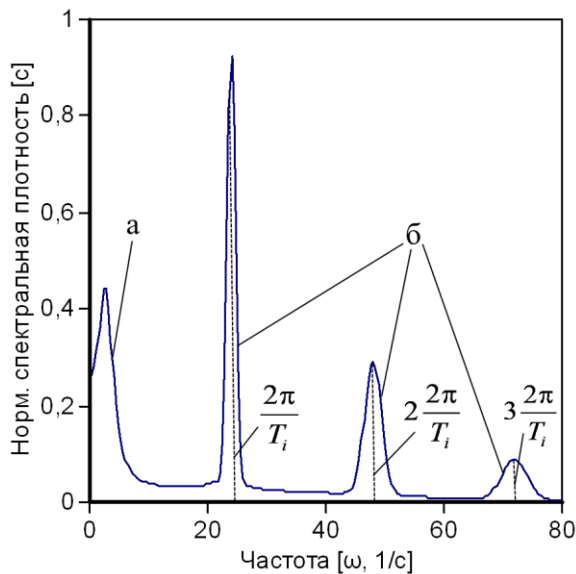


Рис.2. Нормированная спектральная плотность момента на фрезе

Частотный состав нагрузки имеет сложную структуру и зависит от вида как спектральных, так и взаимных спектральных плотностей моментов. В выражении (1) можно выделить три части.

Первая часть, включающая слагаемые пропорциональные дисперсиям параметров,

зависит от квадрата модуля спектра момента на одиночном резце при взаимодействии с дорожным полотном. Диапазон частот Δf , занимаемый этой частью можно оценить из выражения [8, 9]:

$$\Delta f \tau = const,$$

где τ – длительность импульса, с.

Таким образом, при учете 90% мощности, сосредоточенной в интервале частот Δf , имеем $\Delta f \approx 1/\tau$.

Соответственно, ширина этой части спектра будет обратно пропорциональна длительности импульсов.

Для «времени корреляции» [8, 9]:

$$\tau_k = \int_0^{\infty} |\rho_{\varepsilon}(\tau)| d\tau,$$

где $\rho_{\varepsilon}(\tau)$ – нормированная корреляционная функция процесса, может быть получено аналогичное соотношение:

$$\tau_k \approx 1/4\Delta f.$$

Вторая часть состоит из слагаемых, пропорциональных корреляционным функциям как разнородных, так и однородных параметров. Частотный состав определяется спектром момента на резце при взаимодействии с дорожным полотном $S_{0i}(j\omega; \omega_{\phi}; P_{qi})$, спектральными плотностями параметров импульсов и функцией:

$$Z_i(\omega) = \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_l} \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_{\phi}} (\varphi_{im} - \varphi_{il}) \right], \quad (5)$$

которая зависит от расстановки ножей. Частоты этой части сосредоточены в низкочас-

тотной зоне (рис.2, позиция «а»). Это связано с плавным характером изменения параметров импульсов нагрузки на фрезе при взаимодействии с дорожным полотном и небольшой скоростью передвижения агрегата.

Третья часть спектральной плотности обусловлена периодичностью взаимодействия резцов с обрабатываемым материалом. Величина ее пропорциональна квадратам средних значений параметров импульсов и представляет собой последовательность пиков, лежащих на частотах $\omega_{ki} = 2\pi k / T_i$, $k = 1, 2, 3, \dots$ (рис. 2). Их форма определяется функцией, описывающей плотность распределения угловой скорости фрезы. Вид ее так же зависит от спектра момента $S_{oi}(j\omega; \omega_{\phi}; P_{qi})$ и от схемы расположения режущих элементов, влияние которой определяется выражением (5). На рис.2 она обозначена как «б».

Выражения для взаимных спектральных плотностей (3) имеют две основных части.

Первая часть пропорциональна корреляционным и взаимным корреляционным функциям параметров импульсов нагружения, как в направлении движения агрегата, так и перпендикулярно ему. Вид определяется спектром момента сопротивления на ножах и схемой их расстановки на фрезе.

Вторая часть пропорциональна средним параметрам импульсов. Вид определяется функцией плотности распределения угловой скорости рабочего органа, спектром момента сопротивления на резцах и зависит от их расстановки на фрезе.

Известно, что для линейных систем результат внешнего случайного воздействия зависит от передаточной функции системы [8, 9]:

$$S_H(\omega) = |W(\omega)|^2 S_M(\omega),$$

где $|W(\omega)|^2$ – квадрат модуля передаточной функции функции системы; $S_M(\omega)$ – спектральная плотность внешнего воздействия.

При слабом демпфировании квадрат модуля передаточной функции содержит несколько пиков, соответствующих значениям собственных частот системы [9]. При попадании их в интервал частот, занимаемый

спектральной плотностью нагрузки, произойдет увеличение нагруженности в элементах динамической системы. Это связано с возбуждением колебаний с собственными частотами.

В частности, при совпадении частот $\omega_{ki} = 2\pi k / T_i$, $k = 1, 2, 3, \dots$ с собственными будет оказываться наибольшее воздействие на динамическую систему.

Анализ частотных свойств момента сопротивления позволяет не только объяснить особенности формирования динамических нагрузок в элементах конструкции дорожных фрез, но и наметить пути выбора их рациональных параметров и режимов работы, с целью повышения надежности фрезерующих агрегатов.

6. Заключение

В статье представлена методика расчета спектральной плотности момента на фрезерном барабане на стадии проектирования. Она учитывает периодический характер взаимодействия резцов с дорожным покрытием, а так же случайные условия и режимы работы фрезерующего агрегата.

Рассмотрено определение исходных данных необходимых для проведения расчета. Дан анализ полученных выражений, рассмотрены основные характерные особенности нагрузок на рабочем органе.

Для использования разработанной методики расчета спектральной плотности в дальнейшем предполагается рассмотреть ряд вопросов, связанных с анализом условий формирования нагрузок на фрезерном барабане:

- определение вероятностных характеристик физико-механических свойств дорожного полотна с учетом деградации его свойств, процессов старения и износа при эксплуатации;
- определение вероятностных характеристик глубины фрезерования с учетом профиля поверхности дорожного полотна, наличия дефектов, таких как колеиность, просадки, проломы и выбоины, конструкции подвески рабочего органа и системы регулирования;
- уточнение механизма формирования момента сопротивления с учетом неодно-

родной структуры асфальтобетона, связанной с наличием щебня разной фракции в его составе и дефектов в обрабатываемом объеме материала;

- определение параметров импульсов (форма, длительность и амплитуда) и их вероятностных характеристик, возникающих на режущем элементе с учетом кинематики его движения, физико-механических свойств обрабатываемого материала;

- разработка методики учета влияния динамических свойств двигателя на формирование момента на рабочем органе и расчета

плотности распределения угловой скорости фрезы;

- разработка методики учета влияния внешней динамики дорожной фрезы на формирование нагрузок.

Предложенная в статье методика позволяет на стадии проектирования провести исследование динамической нагруженности элементов конструкции дорожной фрезы, осуществить расчет показателей надежности и является основой разработки методов выбора ее оптимальных параметров и режимов работы.

Список литературы

1. Баловнев В.И., Беляев М.А. Машины для содержания и ремонта городских и автомобильных дорог. Омск: ОАО «Омский дом печати», 2005. 768 с.

2. Баловнев В.И. Оценка инновационных предложений в дорожной и строительной технике. М.: МАДИ (ГТУ), 2008. 100 с.

3. WIRTGEN. Cold Recycling Technology, 1 st. edition. Wirtgen GmbH, 2012. 370 p.

4. WIRTGEN. Cold milling manual. Technology and application. Wirtgen GmbH, 2013. 244 p.

5. Баловнев В.И. Машины для безотходной технологии ремонта и восстановления автодорог. Конструкция. Расчет. Потребительские свойства. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020. 183 с.

6. Ma Peng-yu, Hu Yong-biao, Zhang Zhong-hai. The dynamical model of a cold milling machine and its adaptive power control simulation // *Simulation*. 2011. Vol. 87 (9). P. 809-817.

DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549710371385>

7. Peng-yu Ma, Yong-biao Hu, Xin-rong Zhang. Selection of Adaptive Power Control Parameters for a Cold Milling Machine and its Simulation // *Simulation*. Vol. 83(12). P. 843-850.

DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549708089111>

8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

9. Светлицкий В.А. Статистическая ме-

References

1. Balovnev V.I., Belyaev M.A. *Mashiny dlya sodержaniya i remonta gorodskikh i avtomobilnykh dorog* [Machines for maintenance and repair of urban and motor roads]. Omsk, ОАО «Omskiy dom pechati», 2005. 768 p. (In Russian)

2. Balovnev V.I. *Otsenka innovatsionnykh predlozheniy v dorozhnoy i stroitelnoy tekhnike* [Evaluation of innovative proposals in road and construction equipment]. MADI (GTU), Moscow, 2008. 100 p. (In Russian)

3. WIRTGEN. *Cold Recycling Technology*, 1 st. edition. Wirtgen GmbH, 2012. 370 p.

4. WIRTGEN. *Cold milling manual. Technology and application*. Wirtgen GmbH, 2013. 244 p.

5. Balovnev V.I., Ivanchenko S.N. *Mashiny dlya bezotkhodnoy tekhnologii remonta i vosstanovleniya avtodorog. Konstruktsiya. Raschet. Potrebitelskie svoystva* [Machines for waste-free technology of road repair and restoration. Design. Calculation. Consumer properties]. Habarovsk, Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2020. 183 p. (In Russian)

6. Ma Peng-yu, Hu Yong-biao, Zhang Zhong-hai. The dynamical model of a cold milling machine and its adaptive power control simulation. *Simulation*, 2011, vol. 87 (9), pp. 809-817.

DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549710371385>

7. Peng-yu Ma, Yong-biao Hu, Xin-rong Zhang. Selection of Adaptive Power Control Parameters for a Cold Milling Machine and its Simulation. *Simulation*, vol. 83(12), pp. 843-850. DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549708089111>

ханика и теория надежности. М.: Издательство МГТУ им Баумана, 2002. 504 с.

10. Фомин К.В. Моделирование и расчет вероятностных характеристик момента сопротивления на рабочем органе дорожной фрезы // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 3. С.407-417. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-03-407-417>.

11. Фомин К.В. К оценке спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе дорожной фрезы на стадии проектирования / /Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. № 1. С. 144-152. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-01-144-152>.

12. Бородачев И.П. Справочник конструктора дорожных машин. М.: Машиностроение, 1965. 725 с.

13. Селиверстов Н.Д. Определение оптимального количества режущих элементов для фрезерования слоев асфальтобетонных и грунтовых покрытий//Вестник МАДИ. №2 (41). 2015. С. 40-44.

14. Строительство и реконструкция автомобильных дорог. Справочная энциклопедия дорожника. Т. I / под редакцией А.П. Васильева. М.: Информавтодор, 2005. 791 с.

15. Котлярский Э.В. Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона. М.: Издательство МАДИ (ГТУ), 2004. 193 с.

8. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical bases of statistical radio engineering]. Moscow, Radio i svyaz, 1989. 656 p. (In Russian)

9. Svetlickij V.A. *Statisticheskaya mekhanika i teoriya nadezhnosti* [Statistical mechanics and reliability theory]. Moscow, Izdatelstvo MGTU im Baumana, 2002. 504 p. (In Russian)

10. Fomin K.V. Modeling and calculation of probabilistic characteristics resistance moment on the working body of the road mill. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.3, pp. 407-417. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-03-407-417>. (In Russian)

11. Fomin K.V. To estimate the power spectral density of the moment on the milling drum of the road mill at the design stage. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp.144-152. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-01-144-152> (In Russian)

12. Borodachev I.P. *Spravochnik konstruktora dorozhnyh mashin* [Road machine designer handbook]. Moscow, Mashinostroenie, 1965. 725 pp. (In Russian)

13. Seliverstov N.D. Determination of the optimal number of cutting elements for milling layers of asphalt concrete and ground surfaces. *Vestnik MADI*, vol. 2 (41), 2015, pp. 40-44. (In Russian)

14. Vasilev A.P. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya avtomobilnykh dorog. Spravochnaya entsiklopediya dorozhnika. Tom I*. [Construction and reconstruction of roads. Reference encyclopedia of the road. Volum]. Moscow, Informavtodor, 2005. 791 p. (In Russian)

15. Kotlyarskij E.V. *Stroitelno-tekhnicheskie svoystva dorozhnogo asfaltovogo betona* [Construction and technical properties of road asphalt concrete]. Moscow, Izdatelstvo MADI (GTU), 2004. 193 p. (In Russian)