

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕТОЧНОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРОВ РЕЗЦОВ НА РАБОЧЕМ ОРГАНЕ ТОРФЯНОГО ФРЕЗЕРУЮЩЕГО АГРЕГАТА НА ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

К.В. ФОМИН, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: fomin_tver@mail.ru

© Фомин К.В., 2021

В статье предложена модель формирования момента сопротивления, учитывающая периодический характер взаимодействия резцов с торфяной залежью, случайные условия и режимы работы агрегата, влияние погрешностей расстановки ножей на корпусе фрезы и их размеров, связанных с изготовлением и монтажом исполнительного органа, а также износом или необратимыми деформациями режущих элементов. На основе модели получены выражения для расчета спектральной плотности момента и исследовано влияние ошибок на его частотные свойства. Отклонение геометрических параметров от «идеальных» значений приводит к появлению дополнительных составляющих на частотах, кратных угловой скорости вращения фрезы в спектральной плотности момента сопротивления. Их величина пропорциональна суммарной погрешности расстановки ножей по углу и суммарной величине отношений ошибок высоты ножа к подаче. Эти факторы необходимо принимать во внимание для агрегатов, работающих при небольших подачах, и рабочих органов с большим числом режущих элементов, а также при расчете динамических нагрузок в элементах конструкции, если собственные частоты системы совпадают или кратны угловой скорости фрезы.

Ключевые слова: торфяной фрезерующий агрегат, фреза, ошибка расположения ножей, ошибка высоты резца, модель нагрузки, спектральная плотность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-46-56

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время фрезерующие агрегаты нашли широкое применение в различных технологических процессах торфяной промышленности [1–3]. Они обеспечивают высокое качество работ, большую производительность и создают предпосылки для комплексной механизации выполняемых операций [2, 3].

В процессе эксплуатации в элементах конструкции торфяных машин с исполнительными органами фрезерного типа действуют значительные динамические нагрузки [4], что приводит к снижению их надежности [5] и ухудшению технико-экономических показателей работы. Основной причиной возбуждения динамических нагрузок является действие сил и моментов на рабочих органах. Они носят резкопеременный и случайный характер [4, 6], который связан с периодическим взаимодействием ножей фрезы с торфяной залежью и древесными включениями [7], а также случайными условиями и режимами работы агрегата [4, 6, 7].

Кроме этого, при определенных условиях на процесс формирования нагрузок может оказывать влияние неточность изготовления и монтажа исполнительного органа. При этом в процессе эксплуатации происходит деградация многих его характеристик, изменяются его геометрические размеры за счет износа или

необратимых деформаций режущих элементов. Последние имеют разную высоту, углы резания и расположены на корпусе фрезы с небольшим сдвигом. Это приводит к трансформации величины и характера силовых факторов на рабочем органе и в элементах конструкции машины.

Таким образом, анализ влияния неточности изготовления рабочего органа и изменения геометрических параметров режущих элементов в процессе работы на величину и частотный состав нагрузки, ее вероятностные характеристики является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛЫ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Если учитывать случайный характер момента на исполнительном органе, расчет динамических нагрузок в элементах конструкции фрезерующего агрегата и анализ показателей его надежности [4, 8] должны основываться на методах теории вероятности [8–10] и статистической динамики механических систем [11–13]. Опыт применения этих методов при решении задач в отраслях горной промышленности [4, 14, 15] показывает, что имеется возможность на практике ограничиться рассмотрением только одномерных и двумерных характеристик процессов при использовании как аналитических и численных методов, так и 3D-моделирования [16–18]. В расчет при этом принимают вероятностные характеристики силовых факторов, такие как дисперсии и спектральные плотности [14, 16, 18].

Для оценки качественной картины влияния погрешности расположения ножей и их размеров рассмотрим фрезу с горизонтальной осью вращения (рис. 1), одной плоскостью резания и K ножами (применяют, например, в машинах для добычи кускового формованного торфа). Радиус рабочего органа – R_ϕ ; глубина фрезерования – H_ϕ ; скорость движения агрегата – W ; угловая скорость фрезы – ω_ϕ .

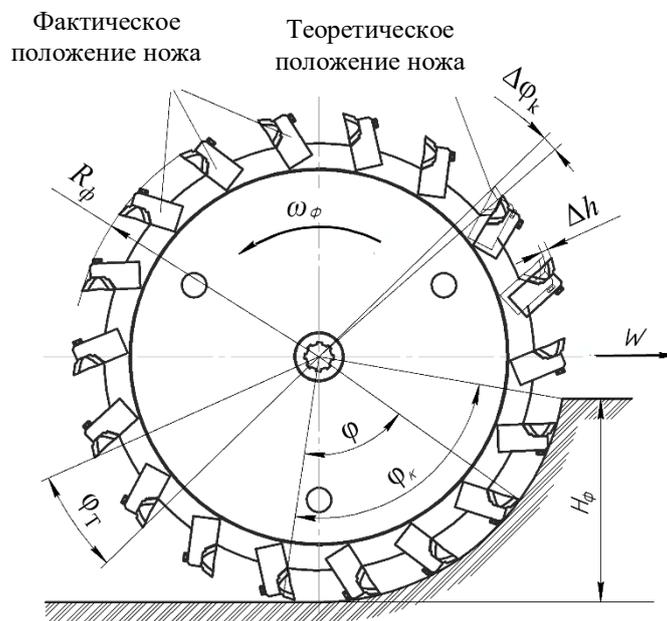


Рис. 1. Схема расположения ножей на рабочем органе

Влияние погрешности расстановки ножей. Учитывая плавность изменения физико-механических свойств торфа, глубины фрезерования и скорости перемещения в течение нескольких оборотов фрезы [4] (так, что в пределах длительности одного оборота эти параметры можно считать примерно постоянными), для момента нагружения имеем (рис. 2):

$$M(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_n(t - nT_0; P_n), \quad (1)$$

где n – номер импульса нагружения; T_0 – длительность одного оборота рабочего органа ($T_0 = 2\pi/\omega_\phi$); $M_n(t; P_n)$ – функция, описывающая момент сопротивления в пределах n -го оборота фрезы:

$$M_n(t; P) = \sum_{k=1}^K M_0(t - t_{0k}; P_n),$$

где K – количество резцов; $M_0(t; P)$ – момент на ноже в пределах угла контакта с залежью; t_{0k} – момент появления k -го импульса нагрузки (с учетом технологической ошибки изготовления и деградации геометрических параметров режущих элементов в процессе работы) ($t_{0k} = [(k-1)\varphi_T + \Delta\varphi_k]/\omega_\phi$, где φ_T – угол между режущими элементами («идеальный» рабочий орган); $\Delta\varphi_k$ – ошибка, связанная с углом установки ножа; ω_ϕ – угловая скорость вращения фрезы); P_n – случайные параметры n -го импульса (для n -го оборота фрезы).

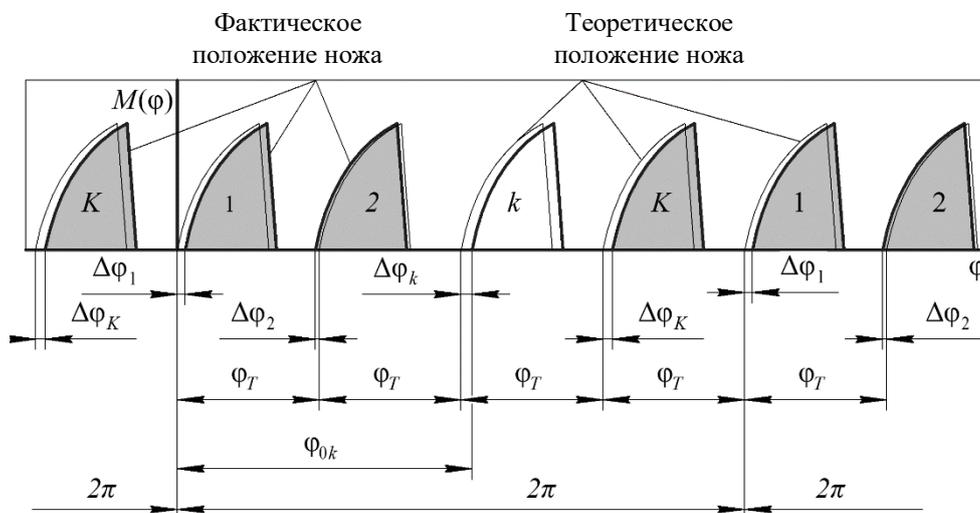


Рис. 2. Модель момента сопротивления с учетом погрешности расположения ножей на рабочем органе

Параметры импульсов являются случайными. Их вероятностные характеристики зависят от конструкции рабочего органа, его угловой скорости, профиля поверхности карты, глубины фрезерования, физико-механических свойств торфа, колебаний, вызванных силами резания и дисбалансом фрезы [4].

Используя подходы, предложенные в [4, 19, 20], для спектральной плотности момента сопротивления с учетом статистической связи между однородными

параметрами импульсов и учетом погрешности угла положения режущих элементов на корпусе фрезы, описываемой моделью (1), можно записать:

$$\begin{aligned}
 S_M(\omega) = & \frac{2}{T_0} \left(\frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 f_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 f_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\
 & + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[\frac{\partial^2 f_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\
 & \left. + \left\{ f_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 f_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta \left(\omega - \frac{2\pi r}{T_0} \right) \right), \omega \neq 0, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где Q – количество параметров; m_q , D_q , K_{qsp} – математические ожидания, дисперсии, корреляционные моменты параметров импульсов;

$$\begin{aligned}
 f_1(\omega; P) &= |S_{Mn}(j\omega; P)|^2; \\
 f_2(\omega; P) &= S_{Mn}(j\omega; P_{qn}) S_{Mn}^*(j\omega; P_{s;n-p}),
 \end{aligned}$$

где знаком * отмечена комплексно-сопряженная величина; $S_{Mn}(j\omega; P_n)$ – спектр момента на фрезе в течение одного оборота:

$$S_{Mn}(\omega; P) = S_0(\omega; P_n) \sum_{k=1}^K \exp \left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} \varphi_{ok} \right), \quad (3)$$

где φ_{ok} – углы между началом отсчета и k -м элементом (рис. 2) (с учетом погрешности расположения ножа); $S_0(\omega)$ – спектр нагрузки при одиночном акте взаимодействия ножа с залежью:

$$S_0(j\omega; P) = \int_0^{\varphi_k/\omega_\phi} M_0(t; P) \exp(-j\omega t) d\varphi,$$

где φ_k – угол контакта резца с залежью.

Подставляя выражение (3) в (2) и преобразуя, для спектральной плотности получим

$$\begin{aligned}
 S_M(\omega) = & \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \exp \left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{ok} - \varphi_{ol}) \right) \times \\
 & \times \frac{2}{T_0} \left(\frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\
 & + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\
 & \left. + \left\{ F_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta \left(\omega - \frac{2\pi r}{T_0} \right) \right), \omega \neq 0,
 \end{aligned}$$

где $F_1(\omega; P) = |S_0(j\omega; P)|^2$; $F_2(\omega; P) = S_0(j\omega; P_{qn}) S_0^*(j\omega; P_{s;n-p})$.

Для оценки влияния погрешности расположения ножей на корпусе фрезы разложим $\exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}\varphi_{0k}\right) = \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}[(k-1)\varphi_T + \Delta\varphi_k]\right)$ в ряд Тейлора (учитывая малость $\Delta\varphi_k$ по сравнению с φ_T) в окрестности точки $k\varphi_T$ и ограничимся линейным членом:

$$\begin{aligned} & \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}[(k-1)\varphi_T + \Delta\varphi_k]\right) = \\ & = \exp\left[-j\frac{\omega}{\omega_\phi}(k-1)\varphi_T\right] \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}\Delta\varphi_k\right) \approx \\ & \approx \exp\left[-j\frac{\omega}{\omega_\phi}(k-1)\varphi_T\right] \left[1 - j\frac{\omega}{\omega_\phi}\Delta\varphi_k\right]. \end{aligned}$$

Учитывая, что [9]

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}\varphi_T(k-l)\right) = \frac{\sin^2(K\omega\varphi_T/2\omega_\phi)}{\sin^2(\omega\varphi_T/2\omega_\phi)}, \quad \varphi_T = 2\pi/K,$$

$$\frac{\sin^2(K\omega\varphi_T/2\omega_\phi)}{K^2 \sin^2(\omega\varphi_T/2\omega_\phi)} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T_0}\right) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi\omega_\phi\rho K}{2\pi}\right) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi\rho}{T}\right),$$

окончательно получим

$$\begin{aligned} S_M(\omega) &= \frac{2}{T} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\ &+ \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \operatorname{Re} \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{p}{2N+1} \right) \sum_{q < s} \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T) + \\ &+ \left\{ F_1(\omega; P_m) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T}\right) \Bigg\} + \\ &+ \left(\frac{\omega}{\omega_\phi} \right)^2 \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \Delta\varphi_k \Delta\varphi_l \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}\varphi_T(k-l)\right) \times \\ &\times \frac{2}{T_0} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\ &+ \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\ &+ \left. \left(F_1(\omega; P_m) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right) \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T_0}\right) \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где T – период повторности импульсов нагрузки ($T = \Phi_T / \omega_\phi$).

В выражении (4) первые четыре члена описывают спектральную плотность момента для «идеального» рабочего органа, а остальные учитывают влияние погрешности расстановки ножей.

Влияние погрешности размеров режущих элементов. Различие в высоте резцов, связанное с ошибками их изготовления и монтажа, а также с их неравномерным износом (см. рис. 1), приводит к изменению величины подачи для каждого режущего элемента. Учитывая, что амплитуда импульса пропорциональна подаче [4, 20], для момента сопротивления в пределах одного оборота рабочего органа имеем

$$M_n(t) = \sum_{k=1}^K \frac{c + (h_k - h_{k+1})}{c} M_0(t - t_k; P_n),$$

где c – подача на нож, когда высота их одинакова; h_k – отклонение высоты k -го режущего от «идеального» значения; $t_k = (k-1)\Phi_T / \omega_\phi$ – момент возникновения k -го импульса.

Следовательно, для спектра момента $M_n(t)$ можно записать

$$S_{Mn}(\omega; P) = S_0(\omega; P) \sum_{k=1}^K \frac{c + \Delta h_k}{c} \exp\left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (k-1)\Phi_T\right], \quad (5)$$

где Δh_k – разница в высоте между отклонениями от «идеального» значения для соседних ножей.

Подставляя выражение (5) в формулу (2) и используя подходы, представленные в статьях [20, 21], для спектральной плотности имеем

$$\begin{aligned} S_M(\omega) = & \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \frac{(c + \Delta h_k)(c + \Delta h_l)}{c^2} \exp\left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} \omega(k-l)\Phi_T\right) \times \\ & \times \frac{2}{T_0} \left(\frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\ & + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\ & \left. + \left\{ F_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T_0}\right) \right), \omega \neq 0. \end{aligned}$$

Преобразуя, получим

$$\begin{aligned} S_M(\omega) = & \frac{2}{T} \left(\frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\ & + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T) + \\ & \left. + \left\{ F_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T}\right) \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \left(\frac{\Delta h_k}{c} + \frac{\Delta h_l}{c} + \frac{\Delta h_k \Delta h_l}{c^2} \right) \exp \left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} \varphi_T (k-l) \right] \times \\
& \times \frac{2}{T_0} \left(\frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\
& + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\
& \left. + \left\{ F_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[\frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta \left(\omega - \frac{2\pi r}{T_0} \right) \right), \omega \neq 0. \quad (6)
\end{aligned}$$

Первые четыре члена в выражении (6) описывают спектральную плотность момента сопротивления для «идеального» рабочего органа без учета влияния погрешности размеров режущих элементов.

Выражения (4) и (6) дают возможность на стадии проектирования определить влияние ошибок, допущенных при монтаже, изготовлении и изменении конструктивных параметров резцов в процессе эксплуатации, на спектральную плотность момента на фрезе и, соответственно, в элементах конструкции агрегата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанные модели и полученные на их основе выражения для расчета спектральных плотностей позволяют выделить некоторые особенности момента на рабочем органе.

Анализ выражений (4), (6) показывает, что при учете погрешностей расстановки ножей и отклонения их высоты от «идеального» значения, которые связаны как с ошибками, допущенными при изготовлении и монтаже, так и с изменениями геометрических размеров, вызванными износом или необратимыми деформациями, происходит обогащение частотного состава нагрузки и увеличение ее дисперсии. При этом в спектральной плотности можно выделить две составляющие: первая соответствует случаю, когда ножи установлены через равные углы относительно друг друга и имеют одинаковую высоту («идеальный» рабочий орган), а вторая учитывает влияние погрешности расположения и размеров.

Спектральная плотность момента для «идеального рабочего органа» имеет три части.

Первая состоит из слагаемых, пропорциональных дисперсиям параметров. Ее величина зависит от квадрата модуля спектра момента на резце при взаимодействии с торфяной залежью. Занимаемый этой частью диапазон частот можно оценить с помощью выражения $\Delta f \approx 1/\tau$, где τ – длительность импульсов нагружения.

Вторая определяется корреляционными моментами параметров. Частотный состав определяется также и спектром момента на резце $S_0(j\omega; P)$.

Третья часть спектральной плотности обусловлена периодическим взаимодействием режущих элементов с залежью (кинематическая составляющая). Ее значение пропорционально квадратам средних значений параметров импульсов. Она представляет собой последовательность дискретных линий (их величина определяется спектром $S_0(j\omega; P)$), лежащих на частотах $\omega_r = 2\pi r/T$, $r = 1, 2, 3, \dots$, т.е. проявляется на частотах, кратных периоду взаимодействия ножей с залежью.

Погрешность размещения режущих элементов и их размеров приводит к возникновению дополнительных составляющих на частотах, кратных угловой скорости фрезы $\omega_r = 2\pi r/T_0$, где $r = 1, 2, 3, \dots$, в спектральной плотности момента. При этом значение спектральной плотности момента в случае учета погрешности расположения пропорционально

$$\left(\frac{\omega}{\omega_\phi}\right)^2 \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \Delta\varphi_k \Delta\varphi_l \exp\left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} \varphi_T (k-l)\right),$$

а при учете отклонения высоты режущих элементов от «идеальной» спектральная плотность зависит от суммарной величины отношения ошибок к подаче:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \left(\frac{\Delta h_k}{c} + \frac{\Delta h_l}{c} + \frac{\Delta h_k \Delta h_l}{c^2}\right) \exp\left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} \varphi_T (k-l)\right).$$

Приведенные результаты теоретических исследований согласуются с выводами, сделанными на основе экспериментальных работ, посвященных анализу влияния погрешности размещения и размеров ножей на величину и характер нагрузок на фрезу [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложены модели формирования момента сопротивления на рабочем органе фрезерующего агрегата. Они учитывают периодический характер взаимодействия резцов с торфяной залежью, случайные условия и режимы работы машины, влияние погрешностей расположения ножей и их размеров, которые вызваны ошибками, допущенными при изготовлении и монтаже исполнительного органа, а также износом или необратимыми деформациями режущих элементов. На их основе получены зависимости для расчета спектральной плотности момента сопротивления.

Показано, что погрешности размещения резцов и их размеров приводят к возникновению дополнительных составляющих в спектре на частотах, кратных угловой скорости фрезы. Их величина определяется суммарной погрешностью расстановки режущих элементов по углу и отношением ошибок высоты ножа к подаче.

Эти факты необходимо принимать во внимание при проектировании фрезерующих агрегатов, работающих при малых подачах, для фрез с большим числом режущих элементов и в случае, если величины собственных частот элементов конструкции агрегата близки или кратны значениям угловой скорости рабочего органа.

Кроме того, представленный подход с учетом этих факторов может быть полезен для обоснования диагностических признаков оценки технического состояния фрезерующего агрегата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Misnikov O.S. Basic technologies and equipment used for peat deposit development in foreign countries // *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2018. V. 41. P. 01046.
2. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985. 211 с.
3. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В., Самсонов Л.Н. Развитие фрезерующих машин в торфяном производстве (анализ, перспективы) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003. № 10. С. 204–207.

4. Самсонов Л.Н., Фомин К.В. Элементы статистической динамики торфяных фрезерующих агрегатов. Тверь: ТГТУ, 2005. 168 с.
5. Горлов И.В., Рахутин М.Г. Влияние пнистости залежи на безотказность торфяных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 12. С. 139–145.
6. Михайлов А.В., Родионов Е.А., Звонарев И.Е. Анализ условий вертикальной выемки торфяного сырья // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 1. С. 48–54.
7. Michailov A.V., Zhigulskaaya A.I., Garmaev O.M. An integrated approach to strip mining of peat // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 378:012087. P. 24–27.
8. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 224 с.
9. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
10. Howard R.M. Principles of random signal analysis and low noise design: The power spectral density and its applications. Willey, 2002. 310 p.
11. Lalanne C. Mechanical Vibration and Shock Analysis, Random Vibration (3rd Edition). John Wiley & Sons, Ltd, 2014. 595 p.
12. Svetlitsky V.A. Statistical dynamics and reliability theory for mechanical structures. Springer, Berlin/Heidelberg, 2003. 452 p.
13. Lutes L.D., Sarkani S. Random vibrations: analysis of structural and mechanical systems. Butterworth-Heinemann, 2004. 635 p.
14. Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургин З.Я. Статистическая динамика горных машин. М.: Машиностроение, 1978. 238 с.
15. Красников Ю.Д. Моделирование разрушения углей режущими инструментами. М.: Наука, 1981. 181 с.
16. Liu C.S., Li D.G., Chen X.P. Shearer Load Identification of the Load Spectrum of the Pick Based on Chaotic Characteristics // *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd*. 2011. V. 199. P. 111–114.
17. Medolago A., Melzi S. A flexible multi-body model of a surface miner for analyzing the interaction between rock-cutting forces and chassis vibrations // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021. V. 31. № 3. P. 365–375.
18. Li X.H., Yu X.W., Ma X.H., Zhao Y.B. Simulation and Study of Random Loads on Continuous Miner Cutting Drum // *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd*. 2011. V. 308. P. 1885–1888.
19. Самсонов Л.Н., Фомин К.В. Определение вероятностных характеристик момента нагружения на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2003. № 3. С. 106–112.
20. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Записки Горного института*. 2020. Т. 241. С. 58–67.
21. Фомин К.В. Моделирование и анализ момента нагружения на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2002. № 2. С. 222–226.

Для цитирования: Фомин К.В. Анализ влияния неточности расположения и размеров резцов на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата на частотные свойства момента сопротивления // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 46–56.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF INACCURACY OF ARRANGEMENT AND HEIGHT OF CUTTERS ON THE WORKING BODY OF A PEAT MILLING MACHINE ON THE FREQUENCY PROPERTIES OF THE RESISTANCE TORQUE

K.V. FOMIN, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: fomin_tver@mail.ru

In the article a model of the moment of resistance is offered which takes into account periodical character of interaction of cutters with a peat deposit, random conditions and modes of machine operation, influence of errors of blade angles on the cutter body and their height, connected with inaccuracy of manufacturing and assembly of an executive body as well as with wear or irreversible deformations of cutting elements. On its basis expressions for calculation of spectral density of the torque are received and influence of errors on its frequency properties is investigated. Deviation of geometrical parameters from the «ideal» values leads to appearance of additional components at frequencies multiple of the cutter angular velocity in the spectral momentum density. Their magnitude is proportional to the total error of blade placement by angle, as well as proportional to the total value of the ratio of blade height errors to feed rate. These factors should be taken into account when working with low feeds and working tools with a large number of cutting elements; when calculating dynamic loads in the elements of a structure if their natural frequencies are the same or close to the cutter angular velocity or multiple of it.

Keywords: peat milling unit, cutter, blade location error, cutter height error, resistance torque, load model, spectral density.

REFERENCES

1. Misnikov O.S. Basic technologies and equipment used for peat deposit development in foreign countries. *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences. 2018. V. 41, pp. 01046.
2. Samsonov L.N. Frezerovaniye torfyanoy zalezhi [Peat Milling]. Moscow: Nedra, 1985. 211 p.
3. Kopenkin V.D., Kopenkina L.V., Samsonov L.N. The development of milling machines in peat production (analysis, prospects). *Gorniy Informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2003. No. 10, pp. 204–207. (In Russian).
4. Samsonov L.N., Fomin K.V. Elementy statisticheskoy dinamiki torfyanikh frezeruyushchikh agregatov [Elements of the statistical dynamics of peat milling units]. Tver: TSTU, 2005, 168 p.
5. Gorlov I.V., Rahutin M.G. Effect of the presence of stumps on no-failure performance of peat machines. *Gorniy Informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*. 2017. No. 12, pp. 139–145 (In Russian).
6. Mikhaylov A.V., Rodionov E.A., Zvonarev I.E. Analysis of conditions for vertical cutting of peat. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*. 2019. No. 1, pp. 48–54. (In Russian).
7. Michailov A.V., Zhigul'skaya A.I., Garmaev O.M. An integrated approach to strip mining of peat. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 378:012087, pp. 24–27.

8. Gusev A.S. Veroyatnostnyye metody v mekhanike mashin i konstruktsiy. [Probabilistic Methods in Mechanics of Machines and Constructions]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2009. 224 p.
9. Levin B.R. Teoreticheskiye osnovy statisticheskoy radiotekhniki [Theoretical bases of statistical radio engineering]. Moscow: Radio i svjaz, 1989. 656 p.
10. Howard R.M. Principles of random signal analysis and low noise design: The power spectral density and its applications. Wiley, 2002. 310 p.
11. Lalanne C. Mechanical Vibration and Shock Analysis, Random Vibration (3rd Edition). John Wiley & Sons, Ltd, 2014. 595 p.
12. Svetlitsky V.A. Statistical dynamics and reliability theory for mechanical structures. Springer, Berlin/Heidelberg, 2003. 452 p.
13. Lutes L.D., Sarkani S. Random vibrations: analysis of structural and mechanical systems. Butterworth-Heinemann, 2004. 635 p.
14. Dokukin A.V., Krasnikov Ju.D., Hurgin Z.Ja. Statisticheskaya dinamika gornyx mashin [Statistical dynamics of mining machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 238 p.
15. Krasnikov Ju. D. Modelirovaniye razrusheniya ugley rezhushchimi instrumentami [Simulation of the destruction of coal by cutting tools]. Moscow: Nauka, 1981. 181 p.
16. Liu C.S., Li D.G., Chen X.P. Shearer Load Identification of the Load Spectrum of the Pick Based on Chaotic Characteristics. *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd.* 2011. V. 199, pp. 111–114.
17. Medolago A., Melzi S. A flexible multi-body model of a surface miner for analyzing the interaction between rock-cutting forces and chassis vibrations. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2021. V. 31. No. 3, pp. 365–375.
18. Li X.H., Yu X.W., Ma X.H., Zhao Y.B. Simulation and Study of Random Loads on Continuous Miner Cutting Drum. *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd.* 2011. V. 308, pp. 1885–1888.
19. Samsonov L.N., Fomin K.V. Definition of probabilistic characteristics of the moment of loading on working body of the peat milling unit. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal.* 2003. No. 3, pp. 106–112. (In Russian).
20. Fomin K.V. Method for estimating the spectrum density of the resistance moment on the working body of a peat milling unit. *Zapiski Gornogo instituta.* 2020. V. 241, pp. 58–67. (In Russian).
21. Fomin K.V. Modeling and analysis of loading torque on the working body of the peat milling unit. *Gorniy Informatsionno-analitichesky byulleten.* 2000. V. 2, pp. 222–226. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 04.08.2021; после рецензирования/revised: 24.09.2021;
принята/accepted: 30.09.2021