

УДК 624.13

Ю.Г. Ревин

ДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ ЗЕМЛЕРОЙНО-МЕЛИОРАТИВНОЙ МАШИНЫ С КОМБИНИРОВАННЫМ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Представлена математическая модель мелиоративного каналокопателя с комбинированным рабочим органом.

Ключевые слова: каналокопатель, динамической системы, математическая модель.

Семинар № 20

Y.G. Revin DYNAMIC LOAD OF EXCAVATING AND AMELIORATORY MACHINERY WITH THE COMPLEX OPERATING EQUIPMENT

The mathematical model of amelioratory trenching machine with the complex operating equipment.

Key words: trench excavator, dynamic systems, mathematical model.

Наиболее представительной подобной машины можно считать каналокопатели с активно-пассивными рабочими органами, где расход мощности на привод передвижения вполне сопоставим с мощностью, расходуемой на привод активного рабочего органа, учёт при анализе динамической нагруженности машины упруго-механической системы привода хода, особенно важен. К таким машинам относятся каналокопатели типа МК-17, МК-23, МК-22.

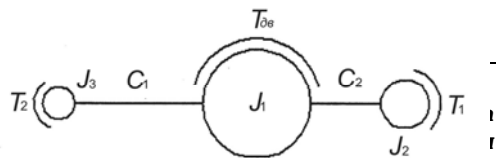
Составим основную матрицу динамической системы плужно-фрезерного каналокопателя, учитывая соотношение, приведённое в 4.7 о возможности пренебрежения для расчётов упруго-механической системой «трактор — рабочий орган», описывающей колебания этой системы в продольной

вертикальной плоскости. Особенно это касается колебаний рабочего оборудования относительно трактора. Для конкретного расчёта примем для рассмотрения каналокопатель МК-23. В этом случае расчётная динамическая схема этой машины будет выглядеть следующим образом:

Движение динамической системы, представленной на рис. 1, может быть описано следующей системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 + C_1 (\varphi_1 - \varphi_2) + C_2 (\varphi_1 - \varphi_3) &= T_{дв} \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 - C_1 (\varphi_1 - \varphi_2) &= T_1 \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 - C_2 (\varphi_1 - \varphi_3) &= r \cdot T_1 + T_2 \\ T_1 &= K_1 \cdot \dot{\varphi}_2 + K_2 \cdot \dot{\varphi}_3 + K_3 \cdot h + m \\ T_2 &= K_4 \cdot h + t \\ h &= H \cdot P_T(s) \\ T_{дв} &= -b\dot{\varphi}_1 + a\ddot{\varphi}_1 \end{aligned} \right\} (1)$$

где J_1 — момент инерции маховика дизеля с приведенными к нему воз-



$$\Delta(s) = \begin{vmatrix} J_1 s^2 + c_1 + c_2 & -c_1 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -c_1 & J_2 s^2 + c_1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -c_2 & 0 & J_3 s^2 + c_2 & 0 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & -K_1 s & -K_2 s & -K_3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_4 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{P_T(s)} & 0 & 0 & 0 \\ bs - as^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

вратно-поступательно движущимися массами; J_2 — приведенный к валу двигателя момент инерции активного рабочего органа (ротора — фрезы); J_3 — приведенный к валу двигателя момент инерции рабочего оборудования машины вместе с трактором в их поступательном движении; C_1 , и C_2 — приведенные к валу двигателя крутильные жёсткости валопровода системы привода фрезы и суммарная жёсткость валопровода системы привода хода и системы агрегатирования рабочего оборудования с трактором; T_1 — приведенный момент сопротивления на фрезе; T_2 — приведенное к моменту сопротивление на рабочем органе в его поступательном движении; $T_{ДВ}$ — движущий момент на валу дизеля; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ — обобщённые координаты; r — коэффициент приведения вращающего момента сопротивления на фрезе к приведённому моменту, действующему на рабочем оборудовании при его поступательном движении; K_1, K_2, K_3, K_4 — частные коэффициенты, учитывающие влияние на величину момента сопротивления угловой скорости фрезы, поступательной скорости каналокопателя, глубины канала; m — случайная составляющая момента сопротивления на фрезе; t — случайная составляющая сопротивления движения рабочего оборудования, приведённая к моменту; H — неровности поверхно-

сти трассы, как входное возмущение; $P_T(s)$ — передаточная функция гусеничного трактора.

Система дифференциальных уравнений (1) даёт возможность сформировать основную матрицу динамической системы $\Delta(s)$ (2).

Значения моментов инерции и жёсткостей динамической системы определены по известным формулам, с использованием рабочих чертежей машины. Коэффициенты K_1, K_2, K_3, K_4 определены по методике, разработанной автором.

При оценке динамических явлений для машины МК-23, к которым можно отнести в первую очередь колебания потребного момента на валу дизеля, неровности поверхности дна канала, величины моментов в упруго-механических системах привода фрезы и механизма передвижения, были получены следующие результаты.

Для момента дизеля имеем амплитуду от нагрузки на фрезе, равную 116,8 Нм, от нагрузки на рабочем оборудовании в его передвижении в продольном направлении — 44,5 Нм. Приведённые цифры относятся к работе плужно-фрезерного каналокопателя при его рабочей скорости 360 м/час на грунтах первой категории.

Для рабочей скорости 720 м/час такие же амплитудные значения момента равны соответственно 31,1 Нм и 13,2 Нм.

Подобная картина наблюдается при оценке упругого момента в трансмиссии. При скорости 360 м/час имеем амплитуду упругого момента в трансмиссии привода фрезы равную 40,5 Нм, в упруго-механической системе привода передвижения машины амплитуда момента равна 23,4 Нм. При скорости 720 м/час амплитуда упругого

момента в приводе фрезы равна 36,3 Нм, для привода хода — 16,3 Нм.

Таким образом, можно отметить значительно большую динамическую нагруженность при работе на малых поступательных скоростях. Следует также отметить и то, что по мере уменьшения поступательной скорости тенденция увеличения динамики снижается. Такую несколько неожиданную картину можно объяснить влиянием забоя на затухание колебаний фрезы и рабочего оборудования в его поступательном перемещении.

Во многом влияние затухания забоя на величину колебаний, особенно фрезы, воплощается в коэффициенте r , с помощью которой в математической модели осуществляется приведение горизонтальной составляющей реакции грунта на фрезу к крутильной системе:

$$r = (P \cdot \cos \varphi - N \cdot \sin \varphi) \frac{r_{pd} \cdot i_a}{k_a \cdot i_n \cdot P}, \quad (3)$$

где P — суммарная окружная реакция грунта при его копании на фрезу; N — суммарная нормальная реакция грунта при его копании на фрезу, $N \approx (0,4 \dots 0,5)P$; r_{fb} — радиус фрезы; $r_{зв}$ — радиус звёздочки гусеничного движителя базовой машины; I_{fb} — передаточное число трансмиссии от коленчатого вала дизеля до фрезы; i_n — передаточное число трансмиссии от звёздочки гусеничного движителя до коленчатого вала дизеля; φ — угол наклона реакции P к горизонту.

$$\begin{aligned} r &= \frac{i_{fb}}{R_{fb}} (\cos \varphi - 0,5 \sin \varphi) \frac{r_{зв}}{i_n} = \\ &= \frac{\omega_{дв}}{\omega_{fb}} \cdot R_{fb} \cdot \frac{r_{зв} \cdot \omega_{зв}}{\omega_{дв}} (\cos \varphi - 0,5 \sin \varphi) = \\ &= \frac{V_n}{V_{fb}} (\cos \varphi - 0,5 \sin \varphi) = \\ &= \frac{0,1}{8} \cdot 0,5 \cdot 0,707 = 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,005 \end{aligned} \quad (4)$$

Знак «минус» в формуле (4) означает, что суммарная нормальная реакция на фрезу направлена в сторону забоя, т.е. стремится «затянуть» фрезу в забой. Эта ситуация справедлива при заточенных режущих элементах. По мере их затупления, направление и величина нормальной составляющей суммарной реакции грунта при его копании на фрезу увеличивается в значительной степени.

Расчёты показывают, что чем больше затупление режущих элементов, тем меньше динамика в приводе каналокопателя. Этот расчётный эффект вполне объясним явлениями затухания колебаний. Универсальная математическая модель плужно-фрезерного каналокопателя, представленная системой уравнений (1), основной матрицей динамической системы (2), позволяет получать данные о неровностях поверхности дна канала.

Результаты расчётов таковы: при амплитудах неровностей трассы, равных 8...9 см и длинах неровностей 9...10 см, амплитуды неровностей дна канала равны 9...10 см.

Уменьшение амплитуды неровностей возможно главным образом за счёт некоторых конструктивных изменений системы агрегатирования рабочего оборудования с базовой машиной — трактором. Наиболее действенным и практически осуществимым является установка силового гидравлического цилиндра в задней части рабочего оборудования с целью опоры на заднюю дополнительно установленную лыжу, движущуюся по дну канала при плавающих цилиндрах навесной системы базовой машины.

Для сравнения теоретических результатов и результатов экспериментальных исследований в ниже приведены итоги статистической обработки записей крутящего момента на карданном валу привода фрезы.

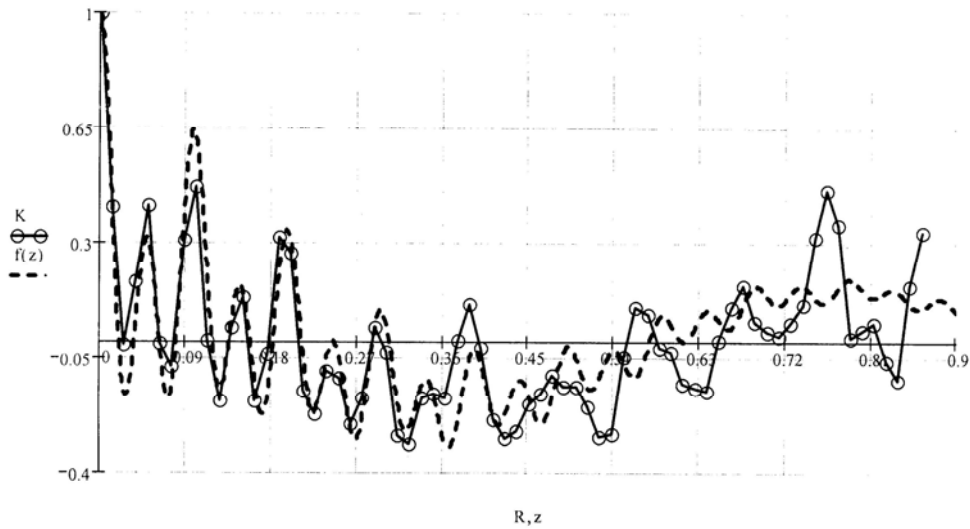


Рис. 2. Графики нормированных корреляционных функций упругого момента на карданном валу привода фрезы: 1 — эмпирическая корреляционная функция, (сплошная линия); 2 — кривая нормированной корреляционной функции, построенной после аппроксимации эмпирической функции аналитическим выражением, (пунктирная линия)

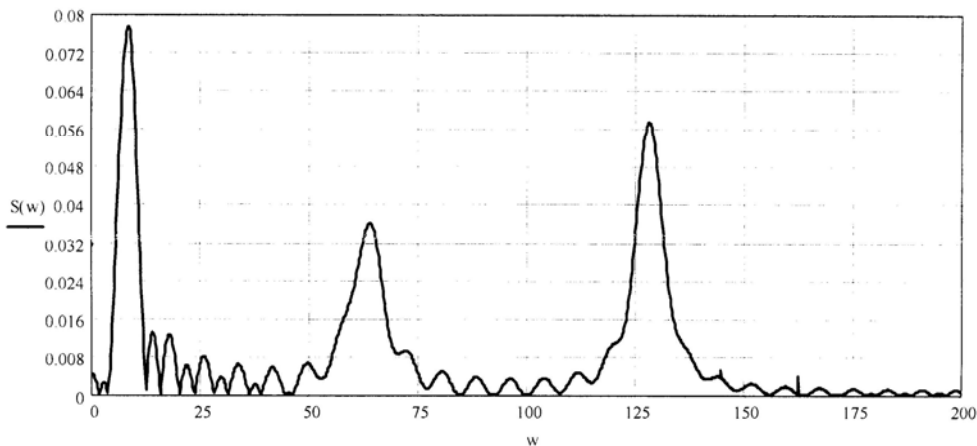


Рис. 3. График нормированной спектральной плотности упругого момента на карданном валу привода фрезы плужно-фрезерного каналокопателя типа МК-23

На рис. 2. представлены графики нормированных корреляционных функций вращающего момента в упруго-механической системе привода фрезы. Анализ этих графиков показывает, что в составе исходных реализаций наблюдаются, по крайней

мере, три устойчивые периодические системы колебаний с частотами $\omega_1 \approx 120 \dots 130 \text{ c}^{-1}$; $\omega_2 \approx 60 \dots 65 \text{ c}^{-1}$; $\omega_3 \approx 8 \text{ c}^{-1}$. При этом частота ω_3 полностью соответствует частоте вращения фрезы, $\omega_2 \approx \omega_3 \cdot z$, где z — число режущих элементов на фрезе ($z = 8$).

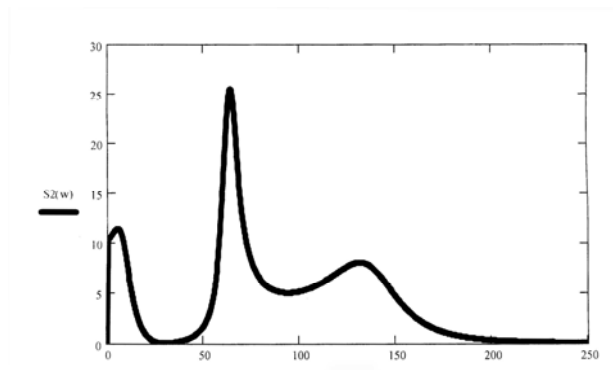


Рис. 4. График спектральной плотности упругого момента в приводе фрезы, построенный в соответствии с математической моделью (1)

Таким образом, частоты ω_2 и ω_3 определяются конструкцией и кинематическими параметрами активного рабочего органа (фрезы). Причём распределение дисперсии по этим периодическим составляющим таково: на колебания с частотой ω_2 , приходится примерно 20 % от общей дисперсии, а на колебания с частотой ω_3 — 5...10 % от общей дисперсии.

Что касается частоты $\omega_1 \approx 120...130 \text{ с}^{-1}$, то эта частота есть проявление динамических свойств привода фрезы и равна парциальной собственной частоте упруго - механической системы привода фрезы. На эти колебания приходится около 40 % общей дисперсии. Эта величина по результатам статистической обработки равна $D \approx 2000 \text{ (Нм)}^2$.

Нормированная корреляционная функция упругого момента в приводе фрезы может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$K(\tau) = A_0 e^{-\alpha_0 \tau} + A_1 e^{-\alpha_1 \tau} \cos \omega_1 \tau + A_2 e^{-\alpha_2 \tau} \cos \omega_2 \tau + A_3 e^{-\alpha_3 \tau} \cos \omega_3 \tau \quad (4)$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 — коэффициенты, показывающие как распределяется общая дисперсия динамического процесса по соответствующим составляющим; $A_0 + A_1 + A_2 + A_3 \cong 1$; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — коэффициенты, сви-

детельствующие о степени узкополостности соответствующей составляющей динамического процесса;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$, — величины круговых частот колебаний соответствующих составляющих динамического процесса.

На рис. 3. приведён график спектральной плотности упругого момента, полученный в результате преобразования Фурье формулы 4.

$$S(\omega) = \int_0^{0,8} K(\tau) \cdot \cos(\omega \tau) d\tau \quad (5)$$

Графики на рис. 3 особенно наглядно подтверждают, что в составе динамических реакций присутствуют периодические составляющие как вызываемые внешними возмущениями, так и внутренними причинами.

На рис. 4 представлен график спектральной плотности нагрузки в упруго-механической системе привода фрезы, полученный в результате расчетов в соответствии с приведенной выше математической моделью. Этот график свидетельствует о хорошем соответствии теории и эксперимента.

Вывод

Представленная в статье математическая модель мелиоративного каналокопателя с комбинированным рабочим органом позволяет с большой степенью достоверности прогнозировать количественные характеристики динамических нагрузок в различных элементах машины при учете ее конструктивных, технологических, режимных параметров. **ИИЭ**

Коротко об авторе

Ревин Ю.Г. – Московский государственный университет природоооустройсва, mail@mgup-msuee.mail.ru

