

ЖЕПИНИЧ Џвннн

Горно-геологический факультет  
Университета в Тузле, Югославия

ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА

**Резюме.** В работе наведён алгоритмы для определения внешней нагрузки на валу ротора от сопротивления копанью. Компоненты внешней нагрузки определены для роторных экскаваторов  $SR_g(H) 401-15/1,5$  и  $C700$  в условиях выемки на открытых разработках в нашей стране. Совершены экспериментальные измерения и анализ компонентов внешней нагрузки в конкретных условиях работы этих экскаваторов применением теории о стационарных стохастических процессах.

Предложенную методологию и полученные результаты можно использовать как при эксплуатации, так и при проектировании роторных экскаваторов.

ВВЕДЕНИЕ

Определение внешней нагрузки на ротор от сопротивления копанью основная потребность как при проектировании, так и при эксплуатации роторных экскаваторов. Большое количество параметров, которые определяют сопротивления в процессе вскапывания выемки роторным экскаватором, распределены в три группы: параметры породной массы, геометрические параметры выемки и конструктивно-кинетические характеристики рабочей машины - роторного экскаватора.

На основе известных параметров выемки из приведённых групп определена внешняя нагрузка на ротор от сопротивления в процессе выемки, как периодическая функция. Кроме этого, утверждена методология и совершены экспериментальные исследования внешней нагрузки, как случайной функции в конкретных условиях работы экскаватора  $SR_g(H)401$  и экскаватора  $C700$ .

РАСЧЁТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ НА РОТОР,  
ПРОИСХОДЯЩЕЙ ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫЕМКЕ

Вследствие специфики рабочего процесса выемки роторными экскаваторами, периодического входа и выхода ковша из захватов, внешняя нагрузка на ротор имеет периодический характер. Сопротивление выемке на отдельных ковшах

$F_1$ , которые в контакте с породной массой, состоятся из трёх компонентов (рис. 1):

$$F_1 = \sqrt{F_{T1}^2 + F_{N1}^2 + F_{B1}^2} \quad (1)$$

где:

$F_{T1} = K_L l_{er}$  - тангенциальный компонент сопротивления породы,

$F_{N1} = \psi_N F_{T1}$  - нормальный компонент сопротивления,

$F_{B1} = \psi_B F_{T1}$  - боковой компонент сопротивления,

$K_L$  - специфическое сопротивление копания,

$l_{er}$  - средняя активная протяжённость резки одного ко. ла,

$\psi_N, \psi_B$  - коэффициент, полученный с помощью эксперимента.

Для определения всей нагрузки от сопротивления копания можно сопротивление на отдельных ковшах, которые в контакте с откапываемой массой, заменить общей нагрузкой, действующей на вал ротора, моментом  $M$  и силой  $F$ , которые действуют в плоскости вращения ротора, а также и общей силой  $F_B$  от боковых нагрузок и моментом  $M_B$ , которые действуют в плоскости поворотов ковша ротора (рис. 1а). Для определения силы  $F$  совершенно её разложении на горизонтальный  $F_H$  и вертикальный  $F_V$  компоненты рис. 1б.

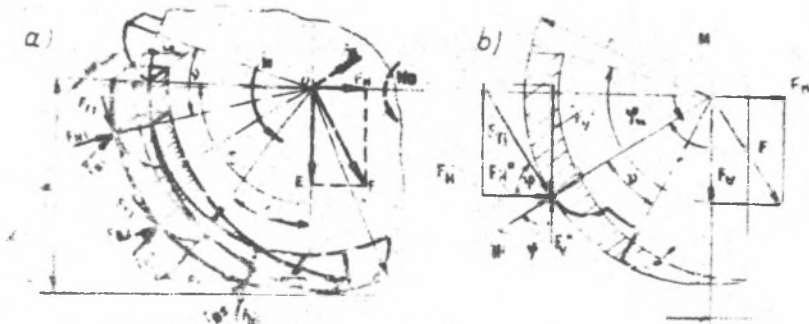


Рис. 1

- а) изображение внешней нагрузки от сопротивления копания на роторе,  
 б) разложение сил на ковшах экскаватора

Анализируя внешнюю нагрузку, необходимо определить изменение указанных моментов и сил на валу ротора в зависимости от данных параметров вскапывания (вземки). Расчётная вместимость ковша  $E_r$ , боковая высота ковша  $h_{ved}$ , мощность мотора - двигателя ротора  $N_r$ , коэффициент полезного действия привода механизма ротора  $\eta$ , диаметр ротора  $D(r)$ , число вытраснений из

ковша в минуту  $n_1$ , число ковшов  $Z$ , коэффициенты  $\Psi_N, \Psi_r$ , емкостная масса материала  $\gamma$ , коэффициент рыхлости материала  $K_r$ , удельное сопротивление копания  $K_L$  и высота разреза  $h$  влияют на внешнюю нагрузку и являются входными сведениями и, как видно из данных уравнений, определяют техническую мощность  $Q_{th}$ , скорость резки  $v_r$ , угол от входа до выхода ковша из захвата  $\varphi_u$ , толщину разреза в оси хода экскаватора  $C_r$ , ширину разреза  $b_o$ , скорость поворотов ковша в оси хода экскаватора  $V_{ko}$ , общую среднюю активную длину резки  $L_{gr}$ , которые показаны в первой части алгоритма для определения, общей суммарной нагрузки на валу ротора, которая показана на таблице 1.

Во второй части алгоритма (таблица 1) показаны уравнения для определе... компонентов внешней нагрузки, имеющие следующие обозначения:

- $M_1$  - увеличение момента в плоскости поворотов ротора при входе ковша в захват,
- $M_2$  - уменьшение момента на валу ротора при выходе ковша из захвата,
- $M_{gr}, M_{max}, M_{min}$  - средний, максимальный и минимальный общие моменты на валу ротора от сопротивления копания,
- $M_{Qgr}, F_{Qgr}$  - средний момент, сила от сопротивления при подъеме вскапываемой породной массы до места вытрясения,
- $F_{Vgr}, F_{Vmax}, F_{Vmin}$   
( $F_{Hgr}, F_{Hmax}, F_{Hmin}$ ) - средний, максимальный, и минимальный вертикальный (горизонтальный) компоненты сил на валу ротора в плоскости его вращения,
- $F_{gr}, F_{max}, F_{min}$  - средняя, максимальная и минимальная общая силы на валу ротора,
- $K_{D,m}, K_{D,f}$  ( $K_{D,mb}$  и  $K_{D,mb}$ ) - коэффициенты динамичности внешней нагрузки от момента  $M$  и сил  $F$  (бокового момента  $M_b$  и боковой силы  $F_b$ ).

В общем случае [1] изменение компонентов внешней нагрузки на валу ротора от сопротивления в процесс выемки в функции изменения угла (времени  $t, t.k.$   $v_r = \text{конст.}$ ) можно представить в виде диаграмм, показанных на рисунках 2а и 2б. Вместе с идеализацией условий выемки периодичность изменения внешней нагрузки одинакова времени входа (выхода) ковша в захват.

$$T = \frac{60}{n_1}, \text{ с} \tag{5}$$

« круговая частота периодического изменения такова:

$$\Theta = \frac{2\omega}{T}, \frac{1}{\text{с}} \tag{6}$$

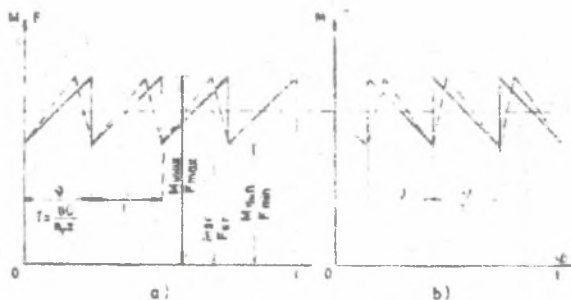


Рис. 2. Приближительное выражение компонентов внешней нагрузки на валу ротора от сопротивления в процессе выемки

а) работа в вертикальном разрезе, б) работа в горизонтальном разрезе

На основе алгоритма (таблица 1) на счётно-вычислительной машине определены компоненты внешней нагрузки для роторных экскаваторов SR<sub>g</sub>(H)401-15/1,5 и С7000. Входными данными были параметры рабочих сред, а геометрические параметры выемки определены из конкретных условий работы этих экскаваторов. Полученные результаты момента  $M_b$  плоскости вращения ротора показаны на рисунках [3 и 4].

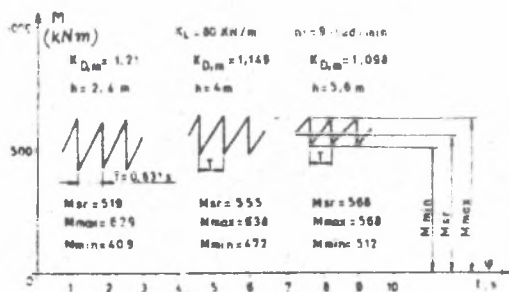


Рис. 3. Изменение расчётного момента ротора экскаватора SR<sub>g</sub>(H)401 для условий выемки глинистой породы на РК "Шикеле" в Лукавце

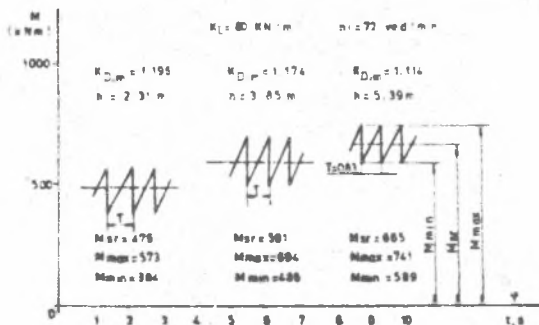


Рис. 4. Изменение расчётного момента M экскаватора С700 для условий выемки туфовой серожатой глины на РК "Омарска" в Предоре

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ НА РОТОРЕ  
ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВЬЕМКИ

Опыты и анализы показывают, что вследствие неоднородности породной массы, которую вскапываем, отсутствия ясной периодичности в отламывании при резке, действия динамических свойств конструкции на процесс выемки различных слоёв и т.п. применяется сопротивление породной массы в процессе выемки, а также и внешняя нагрузка, действующая на ротор и имеющая случайный характер. Постоянный случайный процесс, каким является общее сопротивление копанью, является режимом неустойчивых осцилляций некоторой приблизительно-средней величины (рис. 5). Конкретные значения, которые получает случайная функция, называются реализацией случайной функции  $x(t)$ . При статистической обработке реализации случайной функции, записанной на ленте осциллоскопа, для измерения силы (момента) ротора (рис. 5) предположится стационарность и эргодичность случайной функции  $x(t)$  и то, что она подчиняется закону нормального распределения [3].

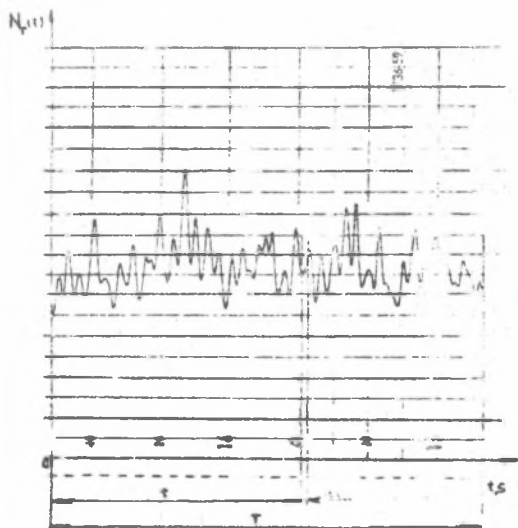


Рис. 5. Часть ленты с осциллографом для измерения мощности двигателя ротора

Стохастические характеристики можем тогда найти по одной реализации функции (процесса) на основе достаточного времени наблюдения  $T$ . Для их вычисления применяем конечные суммы:

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t) \quad - \text{математическое предположение случайного процесса,}$$

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(t)]^2 \quad - \text{дисперсия случайного процесса,}$$

$\sigma = \sqrt{D_x(t_1)}$  - среднее квадратное отклонение,

$k(\tau) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} \dot{x}_i \dot{x}_{i+n}$  - коррелятивная функция.

Для оценки частоты состава случайного процесса используем статистическую характеристику случайного процесса, спектральную плотность  $S_x(\omega)$  которая указывает на скорость изменения среднего квадратного отклонения (относительной дисперсии) в зависимости от частоты:

$$S_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} k_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau$$

конечная сумма, с тем, что шаг  $\Delta \tau = \Delta t$ , равна:

$$S_x(\omega) = \frac{2\Delta t}{\pi} \sum_{i=1}^{1-n} k_x(\tau) \cos \omega_j \tau_i$$

Часто используем нормированную коррелятивную функцию:

$$\rho_x(\tau) = \frac{k_x(\tau)}{D_x}$$

и нормированную спектральную плотность:

$$G_x(\omega) = \frac{S_x(\omega)}{D_x}$$

где:

$x(t_1)$  - текущая ордината записи реализации случайной функции в моменте  $t_1$  (рис. 5),

$\dot{x}(t_1) = x(t_1) - m_x, \dot{x}(t_{1+n}) = x(t_{1+n}) - m_x$  - центрирование случайной функции в моменте  $t_1$  и  $t_{1+n}$ ,

$N = \frac{T}{\Delta t}$  - число ординат во время наблюдения  $T, n = 1, 2, 3, \dots$ ,

$N-1$  - число, определяющее количество сечений на оси абсцисс.

$$\omega_j = j \Delta \omega \quad (j = 1, 2, 3, \dots)$$

$$\tau_i = i \Delta \tau \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n).$$

Интервал  $\tau$  (шаг квантирования) определяется, если используем следующее отношение  $\Delta t = 1/2 f_b = 0,1 \pm 0,085$ , где  $f_b$  частота самых больших отклонений случайного процесса [2].

Из суммы измерений момента (силы) на двигателе ротора экскаватора SR<sub>401</sub>(H)401 (рис. 6) выделена мощность в интервале времени  $T = 51,2$  с (рис. 7а) при выемке глинистой породы на карьере "Шикуде" в Лукавце.

В результате статистической обработки на вычислительной машине получен граф распределения силы (момента) и показан на рисунке 7б. Для данных сведений вычислена нормированная спектральная плотность и показана посредством графа на рисунке 7с.

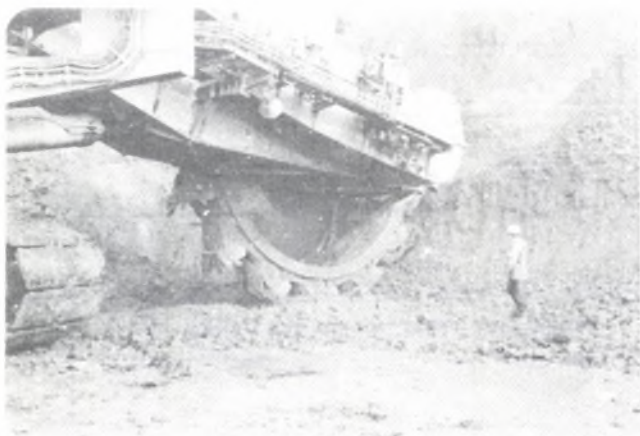


Рис. 6. Роторный экскаватор SR<sub>401</sub>-15/1,5 процесса выемки породы на РК "Шикуде" в Лукавце

Из суммы измерений на экскаваторе С700 в процессе выемки туфовой сырожелтой глины, т.е. породы на карьере железной руды (рис. 8) для толщины разреза  $C_0 = 45$  см, высоты разреза  $h = 3,75$  м и скорости поворота ковша в оси движения экскаватора  $V_{ko} = 12,5$  м/мин в результате статистической обработки получено математическое предложение момента ротора  $M_{rg} = 529,8$  кNm, среднее квадратное отклонение  $\sigma = 103,3$  кNm с коэффициентом дисперсии 19,5%. Для следующих данных на рисунке 5, граф нормированной коррелятивной функции показан на рисунке 9а, а граф нормированной спектральной плотности на рисунке 9.

Результаты исследований показывают, что нормированная коррелятивная функция с достаточной точностью может аппроксимироваться функцией:

$$\rho = e^{-At} \cos Bt$$

при этом  $A$  характеризует интенсивность гашения, а  $B$  среднюю частоту периодических компонентов.

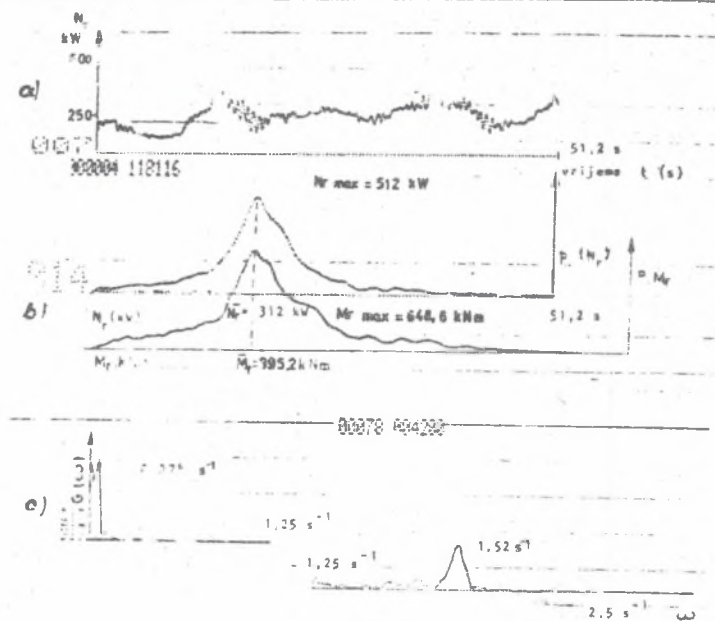


Рис. 7

а) Граф мощности ротора  $N_r$ , б) граф разделения силы момента, в) граф нормированной спектральной плотности



Рис. 8. Роторный экскаватор С700 в процессе выемки породы на РК "Езеро" шахты железной руды "Любля"



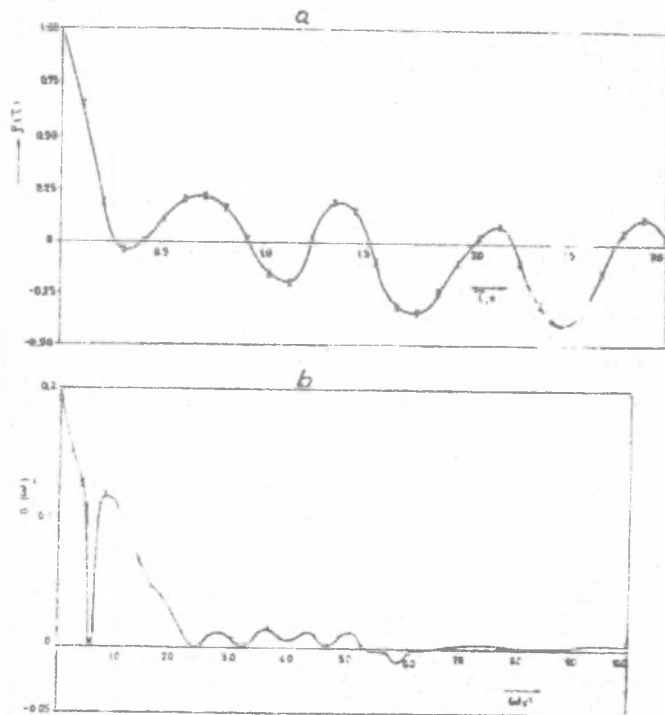


Рис. 9

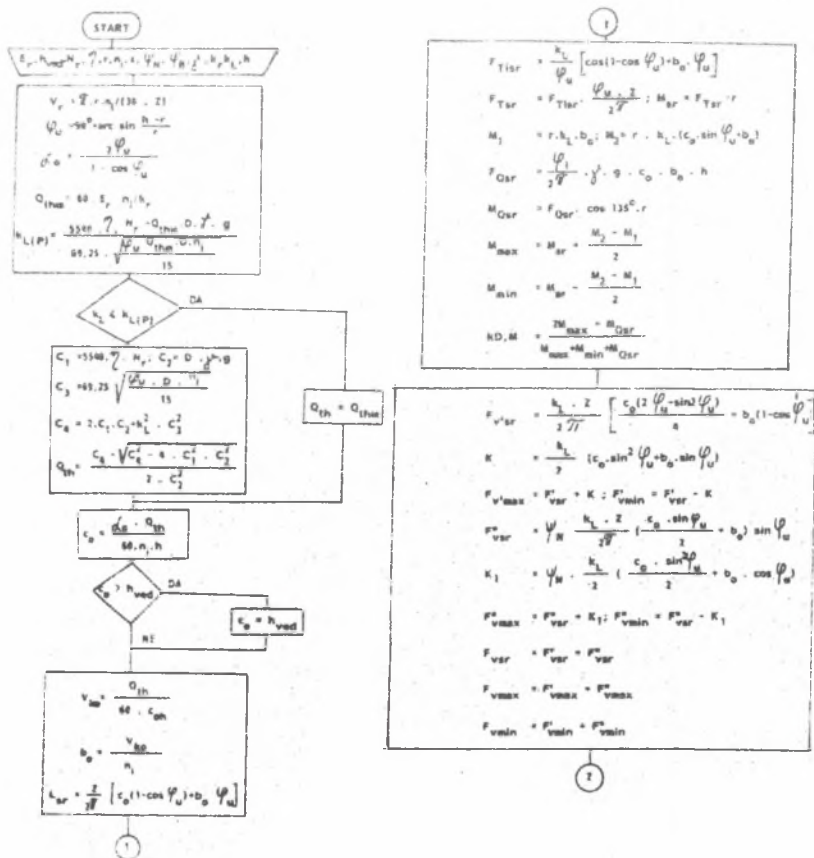
а) граф нормированной коррелятивной функции, б) граф нормированной спектральной плотности

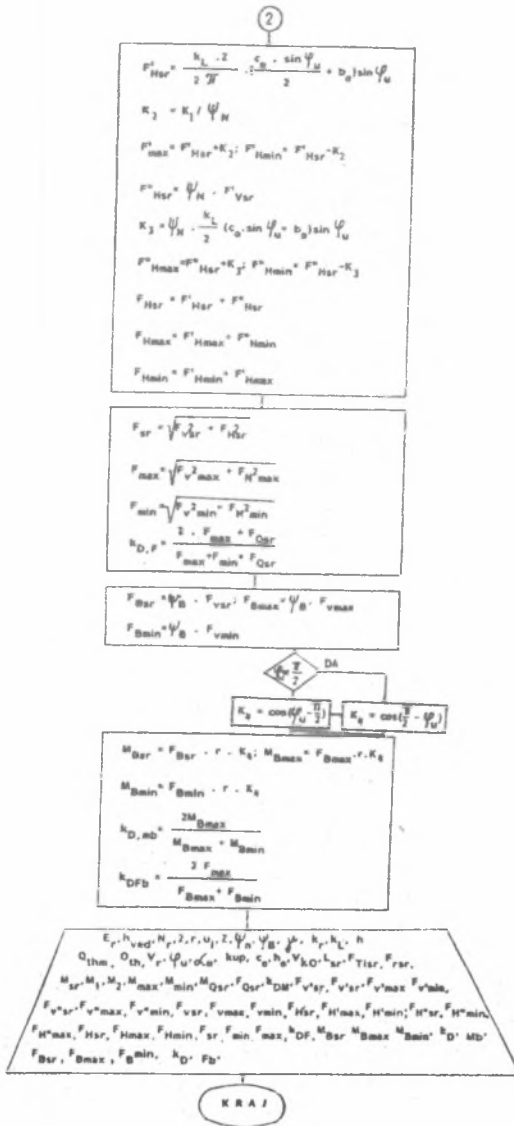
ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волков, Д.П.: Черкасов В.А.: Динамика и прочность многоковшовых экскаваторов и отвалособразователей, Машиностроение, Москва 1969.
- [2] Гусев, А.С.: Светлицкий В.А.: Расчёт конструкций при случайных воздействиях, Машиностроение, 1984.
- [3] Мешинич, В.Ц.: Приложение утверждению динамических характеристик рабочего механизма роторных экскаваторов в условиях изменчивого сопротивления выемке, Технический факультет в Рязке, докторская диссертация, Рязка 1988.

Таблица 1

Алгоритм для определения внешней нагрузки на валу ротора от сопротивления копания





PRZYCZYNEK DO ANALITYCZNEJ I EKSPERYMENTALNEJ OCENY  
ZEWNĘTRZNYCH OBCIĄŻEŃ WAŁU CZERPAKA KOPARKI

S t r e s z c z e n i e

Referat zawiera metodologiczną ocenę zewnętrznych obciążeń wału czerpaka jako funkcję oporu procesu urabiania. W rozważaniach przyjęto pewne wyidealizowane warunki. Zewnętrzne obciążenie jest periodycznie zmienną funkcją. Na jej podstawie opracowano algorytm obliczeniowy na EMC, w którym przyjęto, że zewnętrzne obciążenie jest funkcją urabiania skał. Przykładowe programy wykonano dla koparki SR<sub>s</sub>(H)401-15/1,5, pracującej w odkrywce lignitu i dla koparki C-700, stosowanej w odkrywce rudy żelaza w Jugosławii.

W drugiej części referatu przedstawiono wyniki pomiarów eksperymentalnych wykonanych dla ww. koparek. Wielkościami mierzonymi były następujące parametry: moment obrotowy wału, moc napędu oraz parametry geometryczno-kinematyczne czerpaka. Pomierzone parametry poddano analizie matematycznej stosując teorię stacjonarnych stochastycznych procesów. Matematyczna analiza obejmowała funkcje korelacyjne sporządzone na podstawie pomiarów.

ANALITICAL AND EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF OUTER LOADS  
OF THE BUCKET SHAFT OF AN EXCAVATOR

S u m m a r y

The paper presents methodological assessment of outer loads of the bucket shaft as a function of the resistance of a winning process. In the considerations certain idealized conditions were assumed. Outer loads are a periodically changing function on this basis a computing algorithm was worked out on EMC in which it was assumed that outer loads are a function of winning rocks. Exemplary programmes were done for the excavator SR<sub>s</sub>(H)401-15/1,5 used in a lignite open pit and for the excavator C-700 used in an iron ore open pit in Yugoslavia.

The second part of the paper presents results of the paper presents results of measurements done for the above excavators, the following parameters were measured: output torque, driving power, kinematic and geometric parameters of a bucket. The measured parameters underwent mathematical analysis which correlation functions were done on the basis of measurements.