

УДК 621.878.23-182.38:621.878.62

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН С ЦЕЛЬЮ РАНЖИРОВАНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

**И.А. Недорезов, профессор, д.т.н., Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана, Россия,
Н.Н. Симонов, к.т.н., Научно-исследовательский институт
транспортного строительства, г. Москва, Россия**

Аннотация. Приводится методика имитационного моделирования рабочих процессов землеройно-транспортных машин циклического действия на примере бульдозера и скрепера, основанная на ранжировании факторов, влияющих на эксплуатационную производительность.

Ключевые слова: имитационное моделирование, факторы, ранжирование, эксплуатационная производительность, бульдозер, скрепер.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ЗЕМЛЕРІЙНО- ТРАНСПОРТНИХ МАШИН З МЕТОЮ РАНЖУВАННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ

**І.А. Недорезов, професор, д.т.н., Московський державний технічний
університет імені Н.Е. Баумана, Росія,
М.М. Симонов, к.т.н., Науково-дослідний інститут
транспортного будівництва, м. Москва, Росія**

Анотація. Наводиться методика імітаційного моделювання робочих процесів землерійно-транспортних машин циклічної дії на прикладі бульдозера і скрепера, що базується на ранжуванні факторів, що впливають на експлуатаційну продуктивність.

Ключові слова: імітаційне моделювання, фактори, ранжування, експлуатаційна продуктивність, бульдозер, скрепер.

SIMULATION OF WORKING PROCESSES FOR EARTH-MOVING MACHINERY IN ORDER TO RANK THEIR PARAMETERS

**I. Nedorezov, Professor, Doctor of Engineering Sciences,
Bauman Moscow State Technical University, Russia,
N. Simonov, Candidate of Engineering Sciences,
Central Research Institute for Transport Construction, Moscow, Russia**

Abstract. A simulation of working processes for cyclic-action earth-moving machinery, with bulldozers and scrapers taken as an example, based on ranking the factors affecting the operating productivity has been presented.

Key words: simulation modeling, factors, ranking, service productivity, bulldozer, scraper.

Введение

Имитационное моделирование эффективно использовать при анализе многофакторных систем случайных величин [1], например,

производительности ЗТМ, что позволяет ранжировать действующие факторы по степени их значимости.

Цель и постановка задачи

Целью данной работы является выявление факторов, оказывающих наибольшее влияние на эксплуатационную производительность ЗТМ на примере бульдозера и скрепера, для учёта их влияния при проектировании и эксплуатации. Для достижения цели разработаны математические модели рабочих процессов ЗТМ, проведено имитационное моделирование многофакторных систем случайных величин и ранжирование действующих факторов по степени их значимости.

Имитационное моделирование производительности бульдозера

Для изложения методики имитационного моделирования производительности бульдозера в качестве исходной модели принята математическая модель эксплуатационной производительности землеройно-транспортной машины циклического действия, разработанная на основе энергетического анализа её рабочего процесса, состоящего из трёх основных элементов: копание, транспортирование грунта и холостой ход машины, которая в итоговом виде представлена выражением [2]

$$P_{\Sigma} = \frac{3600N\eta K_{ПК} K_{ПП} K_{В}}{K' \frac{f_{СЦ}}{f_{СЦ} - f_{М}} + \frac{K_{ПК}(1 + K_{ПП})\Delta L f_1}{2}} + \frac{G_{М} L f_{М} K_{ПК} K_{Р}}{3 q K_q}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (1)$$

где N – мощность двигателя, 50÷450 кВт; η – тяговый КПД машины, 0,6÷0,7; $K_{ПК}$ – коэффициент потерь грунта при копании, 0,8÷0,9; $K_{ПП}$ – коэффициент потерь грунта при перемещении, 0,6÷0,96; $K_{В}$ – коэффициент использования бульдозера по времени, 0,77÷0,85; K' – удельное сопротивление копания, 39÷584 кН/м²; $f_{СЦ}$ – коэффициент сцепления движителей с грунтом, 0,7÷1,1; $f_{М}$ – коэффициент сопротивления перемещению машины, 0,08÷0,12; Δ – объёмный вес грунта в плотном теле, 14÷23 кН/м³; L – дальность перемещения грунта, 10÷80 м; f_1 – коэффициент сопротивления перемещению грунта, 0,75÷1,25; $G_{М}$ – вес бульдозера, 80÷720 кН; $K_{Р}$ – коэффициент разрыхления

грунта, 1,1÷1,4; q – вместимость отвала бульдозера, 2,3÷20,7 м³; K_q – коэффициент вместимости отвала бульдозера, 1,05÷1,15.

Примечание: в скобках даны возможные диапазоны изменения факторов, влияющих на эксплуатационную производительность бульдозера, для наиболее распространенных условий эксплуатации.

Для разработки имитационной модели эксплуатационной производительности бульдозера при производстве земляных работ использован аппарат и терминология теории планирования эксперимента [3]. При указанных в таблице 15 факторах линейная модель расчета эксплуатационной производительности принимает вид

$$P_{\Sigma} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + a_6 X_6 + a_7 X_7 + a_8 X_8 + a_9 X_9 + a_{10} X_{10} + a_{11} X_{11} + a_{12} X_{12} + a_{13} X_{13} + a_{14} X_{14} + a_{15} X_{15}, \quad (2)$$

где a_i – неизвестные коэффициенты ($i = 0 \dots 15$); X_i – переменные факторы.

Подставив средние значения факторов в исходное выражение для P_{Σ} , получим значение функции отклика (эксплуатационной производительности бульдозера P_{Σ}) при нулевом уровне факторов, равное 219,1 м³/ч.

Для выявления влияния каждого из факторов на эксплуатационную производительность бульдозера нужно определить отклонение эксплуатационной производительности от среднего значения при наибольшем значении i -го фактора и среднем значении остальных. После подстановки значений коэффициентов a_i линейная модель расчета эксплуатационной производительности бульдозера имеет вид

$$P_{\Sigma} = 219,1 + 175,3 \cdot x_1 + 16,9 \cdot x_2 - 3,3 \cdot x_3 - 42,7 \cdot x_4 + 10,8 \cdot x_5 - 38,6 \cdot x_6 + 1,2 \cdot x_7 - 14,2 \cdot x_8 - 21,1 \cdot x_9 - 123 \cdot x_{10} - 21,7 \cdot x_{11} - 44,2 \cdot x_{12} - 8 \cdot x_{13} + 35,9 \cdot x_{14} + 3,1 \cdot x_{15}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (3)$$

Гистограмма рангов влияния факторов на эксплуатационную производительность бульдозера представлена на рис. 1. Таким образом, незначимыми факторами для расчета эксплуатационной производительности бульдозера можно принять три фактора: $K_{ПК}$ – коэффициент потерь грунта при копании,

$f_{сц}$ – коэффициент сцепления движителей с грунтом и K_q – коэффициент вместимости отвала бульдозера.

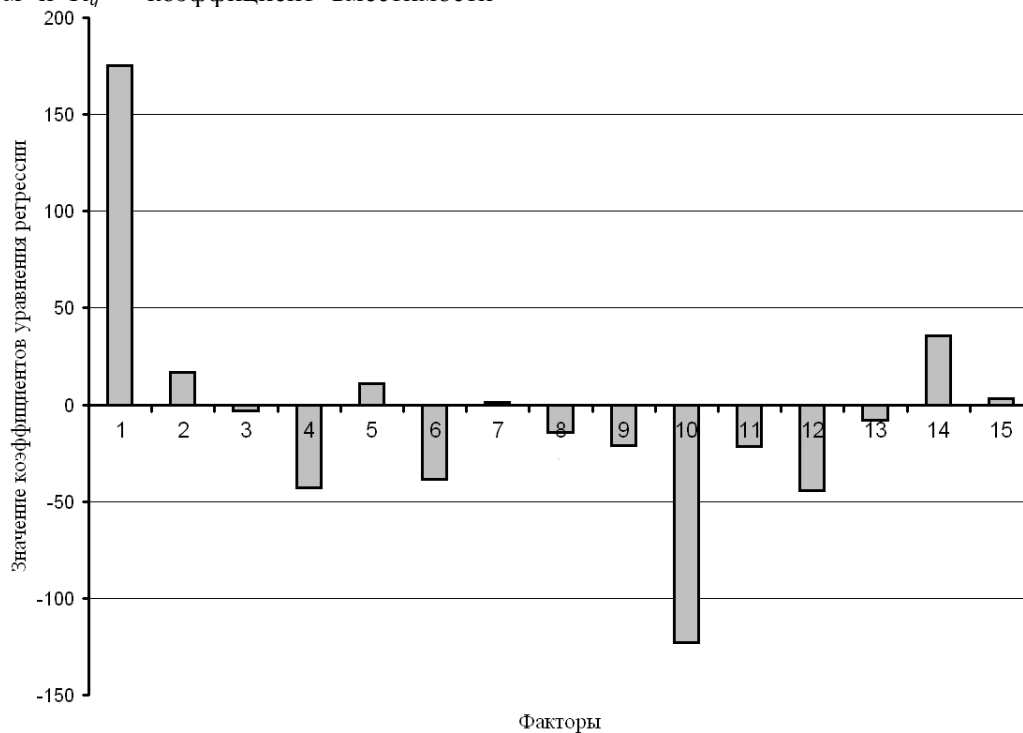


Рис. 1. Гистограмма рангов влияния факторов на эксплуатационную производительность бульдозера

Значимыми факторами являются шесть факторов: η – тяговый КПД машины, K_B – коэффициент использования по времени, f_M – коэффициент сопротивления перемещению машины, Δ – объемный вес грунта в плотном теле, f_1 – коэффициент сопротивления перемещению грунта, K_p – коэффициент разрыхления грунта. Наиболее значимыми являются шесть факторов: N – мощность бульдозера, $K_{ПГ}$ – коэффициент потерь грунта при перемещении, K' – удельное сопротивление копания, L – дальность перемещения грунта, G_M – вес бульдозера, q – вместимость отвала бульдозера.

Данную методику также можно применять и к другим ЗТМ циклического действия, например, скреперам.

Имитационное моделирование производительности скрепера

При имитационном моделировании производительности скрепера в качестве исходной модели также принята математическая модель эксплуатационной производительности землеройно-транспортной машины циклического действия, разработанная на основе энергетического анализа её рабочего процесса, представленная уравнением

ного действия, разработанная на основе энергетического анализа её рабочего процесса, представленная уравнением

$$P_э = \frac{3600QK_{ПГ}K_B}{A_1}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$\frac{N^C \eta^C m_1^C + N^T \eta^T m_1^T}{+ \frac{3600QK_{ПГ}K_B}{\frac{A_2}{N^C \eta^C m_2^C} + \frac{A_3}{N^C \eta^C m_3^C} + t_4}} \quad (4)$$

где A_1 – работа копания грунта с учетом работы перемещения машины на пути копания и совместной работы скрепера с толкачом

$$A_1 = QK' \left[1 + \frac{G_M^C f_M^C + G_M^T f_M^T}{K_0 [(G_{сц}^C f_{сц}^C + G_{сц}^T f_{сц}^T) - \frac{-(G_M^C f_M^C + G_M^T f_M^T)}{K_0}]}, \text{ кДж}; \right] \quad (5)$$

A_2 – работа перемещения грунта и скрепера к месту разгрузки

$$A_2 = Lf_M^C (QK_{ПГ} \Delta + G_M^C), \text{ кДж}; \quad (6)$$

A_3 – работа перемещения грунта и скрепера к месту разгрузки

$$A_3 = G_M^C L f_M^C, \text{кДж}, \quad (7)$$

где $K_{ПК}$ – коэффициент потерь грунта при копании, $0,65 \div 0,85$; η^C – тяговый КПД скрепера, $0,85 \div 0,90$; η^T – тяговый КПД толкача $0,70 \div 0,75$; f_{CC}^C – коэффициент сцепления движителей скрепера с грунтом, $0,30 \div 0,80$; f_{CC}^T – коэффициент сцепления движителей толкача с грунтом, $0,40 \div 1,10$; f_M^C – коэффициент сопротивления перемещению скрепера, $0,03 \div 0,20$; f_M^T – коэффициент сопротивления перемещению толкача, $0,06 \div 0,15$; t_4 – время на маневрирование и разгрузку, $35 \div 50$ с; Δ – объемный вес грунта в плотном теле, $14 \div 23$ кН/м³; K_p – коэффициент разрыхления грунта, $1,10 \div 1,40$; K_q – коэффициент использования вместимости ковша скрепера*, $1,37 \div 1,47$; K_0 – коэффициент одновременности работы толкача и скрепера, $0,85 \div 0,90$; N^C – мощность двигателя скрепера, $246 \div 410$ кВт; N^T – мощность двигателя толкача, $228 \div 634$ кВт; G_M^C – вес скрепера, $320 \div 610$ кН; G_M^T – вес толкача, кН; G_{CC}^C – сцепной вес скрепера, $370 \div 1023$ кН; G_{CC}^T – сцепной вес толкача, $170 \div 323$ кН; q – геометрическая вместимость ковша скрепера, м³; L – дальность транспортирования грунта, $370 \div 1023$ м; K' – удельное сопротивление копанию (энергоёмкость), $10,7 \div 24,5$ кН/м²; K_B – коэффициент использования по времени, $50 \div 1600$; m_1^C – коэффициент использования мощности двигателя скрепера при наборе грунта, $400 \div 500$; m_2^C – коэффициент использования мощности двигателя скрепера при транспортировании грунта к месту разгрузки, $0,77 \div 0,85$; m_3^C – коэффициент использования мощности двигателя скрепера при перемещении к месту набора грунта, $0,5 \div 1,0$; m_1^T – коэффициент использования мощности двигателя толкача при наборе грунта скрепером, $0,5 \div 1,0$; * – при условии, что с использованием толкача ковш скрепера наполняется максимально с «шапкой».

При указанных в таблице 26 факторах линейная модель расчета эксплуатационной производительности принимает вид

$$\begin{aligned} \Pi_3 = & a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + \\ & + a_5 X_5 + a_6 X_6 + a_7 X_7 + a_8 X_8 + a_9 X_9 + \\ & + a_{10} X_{10} + a_{11} X_{11} + a_{12} X_{12} + a_{13} X_{13} + \\ & + a_{14} X_{14} + a_{15} X_{15} + a_{16} X_{16} + a_{17} X_{17} + \\ & + a_{18} X_{18} + a_{19} X_{19} + a_{20} X_{20} + a_{21} X_{21} + \\ & + a_{22} X_{22} + a_{23} X_{23} + a_{24} X_{24} + a_{25} X_{25} + \\ & + a_{26} X_{26}. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставив средние значения факторов в исходное выражение для Π_3 , получим значение функции отклика (эксплуатационной производительности скрепера Π_3) при нулевом уровне факторов, равное $87,98$ м³/ч.

Для выявления влияния каждого из факторов на эксплуатационную производительность скрепера нужно определить отклонение эксплуатационной производительности от среднего значения при наибольшем значении i -го фактора и среднем значении остальных.

После подстановки значений коэффициентов a_i линейная модель расчета эксплуатационной производительности бульдозера имеет вид

$$\begin{aligned} \Pi_3 = & 87,98 + 0,4 \cdot x_1 + 1,83 \cdot x_2 + \\ & + 0,05 \cdot x_3 + 0,08 \cdot x_4 + 0,24 \cdot x_5 - \\ & - 33,04 \cdot x_6 - 0,21 \cdot x_7 - 0,98 \cdot x_8 - \\ & - 5,14 \cdot x_9 - 6,87 \cdot x_{10} + 2,17 \cdot x_{11} + \\ & + 0,02 \cdot x_{12} + 19,78 \cdot x_{13} + 0,67 \cdot x_{14} - \\ & - 14,71 \cdot x_{15} - 0,27 \cdot x_{16} + 0,06 \cdot x_{17} + \\ & + 0,24 \cdot x_{18} + 21,84 \cdot x_{19} - 40,24 \cdot x_{20} - \\ & - 0,38 \cdot x_{21} + 4,34 \cdot x_{22} + 14,81 \cdot x_{24} \\ & + 7,68 \cdot x_{25}, \text{м}^3/\text{ч}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для выявления факторов, оказывающих наибольшее влияние на техническую производительность, проведено ранжирование 26 действующих факторов. Результаты ранжирования факторов, входящих в математическую модель эксплуатационной производительности самоходных скреперов с учетом загрузки с помощью толкача, в виде гистограммы рангов влияния факторов представлены на рис. 2. Наиболее значимыми факторами являются: дальность перемещения грунта – L , коэффициент сопротивления перемещению скрепера – f_M^C , геометрическая вместимость ковша скрепера – q , мощность двигателя скрепера – N^C , коэффициент использования мощности двигателя на этапе транспортирования грунта к месту разгрузки – m_2^C , вес скрепера – G_M^C . К значимым фак-

торам относятся: коэффициент использова-

ния мощности двигателя на этапе холостого

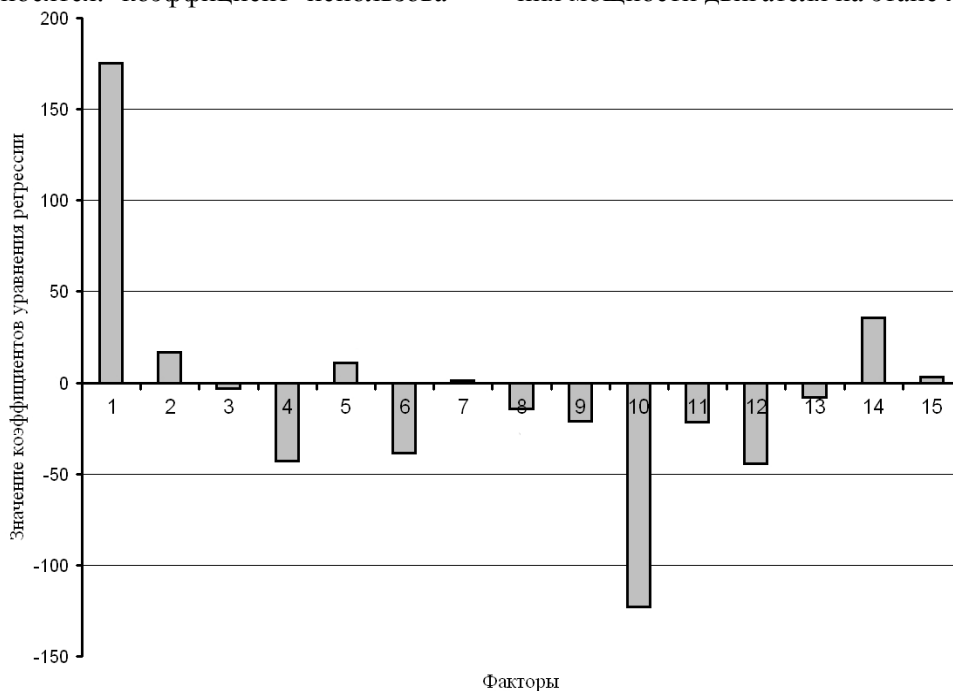


Рис. 2. Гистограмма рангов влияния факторов на эксплуатационную производительность скрепера

хода – m_3^C , коэффициент разрыхления грунта – K_p , объемный вес грунта в плотном теле – Δ , коэффициент использования вместимости ковша скрепера – K_q , коэффициент использования по времени – K_B , тяговый КПД скрепера – η^C , время на маневрирование и разгрузку – t_4 . Остальные 12 факторов не являются значимыми.

Выводы

Наибольшее влияние на рабочий процесс бульдозера оказывает его мощность N , потери грунта в боковые валики при перемещении, отражаемые в коэффициенте $K_{ПП}$, K' – удельное сопротивление копания, зависящее от категории грунта и его состояния, дальность перемещения грунта L , вес бульдозера G_M , вместимость отвала бульдозера q .

В процессе работы скрепера наибольшее влияние на рабочий процесс оказывает дальность транспортирования грунта L и качество транспортных путей, отражаемое коэффициентом сопротивления перекачиванию f_M^C и коэффициентами использования мощности двигателя при транспортировании и движении холостым ходом

m_2^C, m_3^C . Эффективность применения толкачей и их мощность определяются значимостью величины вместимости ковша q и коэффициента ее использования K_q .

Данная методика может быть использована для ранжирования рабочих процессов и других землеройно-транспортных машин циклического и непрерывного действия.

Литература

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
2. Недорезов И.А. Прогнозирование экономической эффективности бульдозеров / И.А. Недорезов, Н.Н. Симонов // Механизация строительства. – 2005. – №7. – С. 22–24.
3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1965. – 280 с.

Рецензент: Л.И. Нефедов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 22 июня 2012 г.