

Научная статья

УДК 621.879:519.876.5

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-2-58-65

Доронин Сергей Владимирович^{1,2}, кандидат техн. наук, доцент, Альшанская Анна Александровна^{2*}, аспирант, ст. преподаватель, Герасимова Татьяна Александровна², кандидат техн. наук, доцент

¹ Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий

² Сибирский федеральный университет

*E-mail: alshanskaya_anna@inbox.ru

МНОГОУРОВНЕВЫЕ ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ НАГРУЖЕННОСТИ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА



Информация о статье

Поступила:

14 декабря 2021 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 марта 2022 г.

Принята к печати:

15 мая 2022 г.

Ключевые слова:

карьерный экскаватор, рабочее оборудование, нагруженность, цифровая модель, системный подход.

Аннотация.

Предложен многоуровневый подход к оценке нагруженности силовых конструкций карьерного экскаватора, основанный на последовательном численном анализе структурно и геометрически нелинейных стержневых моделей металлоконструкций и рабочего оборудования, трехмерных линейных моделей сварных узлов и физически нелинейных моделей деталей. Оцифровка характеристик нагруженности осуществляется в результате многовариантных вычислительных экспериментов по анализу напряженно-деформированного состояния конструкций для дискретных положений рабочего оборудования в пространстве и дискретных значений сопротивления грунта копанью. Цифровые модели нагруженности представляют собой структурированные массивы данных о силовых факторах, действующих во всех элементах конструкции, узлах, деталях, соединениях машины при дискретизированных положениях рабочего оборудования и сопротивления грунта копанью. В целях информационной поддержки жизненного цикла с использованием многоуровневых цифровых моделей нагруженности созданы предпосылки к реализации индивидуализированного подхода к обоснованию расчетных случаев нагружения для каждого узла, получению оценок и обеспечению прочности соединений, прогнозированию накопления повреждений и остаточного ресурса отдельных деталей для управления техническим состоянием. Реализация этого подхода направлена на снижение количества отказов и аварий, а также на повышение надежности парка экскаваторов.

Для цитирования: Доронин С.В., Альшанская А.А., Герасимова Т.А. Многоуровневые цифровые модели нагруженности силовых конструкций рабочего оборудования карьерного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 2 (160). С. 58-65. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-2-58-65

Анализу эксплуатационной надежности карьерных экскаваторов, причин и условий разрушений, отказов и аварий, разработке предложений по их недопущению в течение последних примерно пяти десятилетий посвящено настолько большое количество разноплановых публикаций, что даже написание короткого литературного обзора на эту тему сталкивается со значительными трудностями. Общим для подавляющего числа исследований является констатация факта высокой нагруженности и преобладания количества отказов механической

системы экскаватора по сравнению с электрической.

Получение достоверных оценок нагруженности карьерных экскаваторов существенно осложняется структурной сложностью и нелинейным поведением машин, многообразием пространственных положений рабочего оборудования в течение цикла экскавации, весьма широким диапазоном воздействий на ковш, обусловленным вариабельностью горно-геологических, горнотехнических и климатических условий эксплуатации. В связи с отмеченной сложностью системы «экскаватор-среда»

целесообразна реализация многоуровневого подхода к анализу ее поведения. В пользу этого свидетельствует как теоретическая обоснованность многоуровневого системного подхода [1], так и эффективность его практического применения при решении научно-технических задач различной природы [2-6]. При разработке этого подхода к анализу нагруженности карьерных экскаваторов примем во внимание современные тенденции цифровой трансформации в научно-технической и производственной сферах.

Возникновение и развитие идей четвертой промышленной революции [7, 8] на базе информационных и цифровых технологий [9] привели к появлению концепций киберфизических систем и цифровых двойников [10-14]. Это существенно смещает подходы к организации процессов (в первую очередь проектирования и эксплуатации) жизненного цикла технических объектов. Известен положительный опыт использования цифровых моделей и двойников для предотвращения отказов и повышения надежности технических объектов за счет мониторинга нагруженности и напряженного состояния [15], обнаружения дефектов и повреждений [16], прогнозирования усталостной долговечности [17] сложных механических конструкций в реальном режиме времени.

Основой цифрового двойника любого объекта является мультифизическая модель этого объекта, разрабатываемая специалистами в соответствующей предметной области. В настоящей работе рассматривается вариант построения многоуровневых цифровых моделей нагруженности ряда конструкций карьерных экскаваторов как подготовительная работа к разработке в перспективе цифровых двойников для информационно-вычислительного обеспечения повышения надежности парка горнодобывающего оборудования.

Термин «силовые конструкции рабочего оборудования» не является общепринятым. Традиционно к рабочему оборудованию экскаваторов ЭКГ относятся стрела, рукоять, ковш с подвеской, механизм открывания днища ковша, подвеска стрелы. Однако указанные элементы рабочего оборудования образуют единую конструктивно-силовую схему с двуногой стойкой, подкосами и приводами и не могут рассматриваться без них при детальном анализе работы экскаватора. Поэтому в дальнейшем под силовыми конструкциями рабочего оборудования будем понимать механическую систему, включающую в себя как традиционные элементы рабочего оборудования, так и другие элементы металлоконструкций и приводов, образующих с рабочим оборудованием единую конструктивно-силовую схему.

В основу разработанных цифровых моделей механической системы положены дискретизация физико-механических свойств экскавируемой горной массы и пространственных положений машины в течение цикла экскавации, а также декомпозиция

силовых конструкций рабочего оборудования экскаватора.

Общепринята точка зрения, что нагруженность конструкции экскаватора формируется в результате силового взаимодействия ковша с массивом горной породы, описываемого закономерностями, обоснованными в работах Н.Г. Домбровского, А.Н. Зеленина, В.П. Горячкина. В настоящее время принято количественно описывать это взаимодействие величиной удельного сопротивления копанью, устанавливаемого для грунтов разных категорий [18], которое является интегральной характеристикой физико-механических свойств горной массы. Тогда в первом приближении дискретизация физико-механических свойств заключается в рассмотрении последовательности значений удельного сопротивления копанью в связи с принятой системой категорирования грунтов.

Распределение силовых факторов между элементами силовых конструкций рабочего оборудования обусловлено расчетными положениями последних – комбинациями пространственных положений элементов рабочего оборудования, при которых они испытывают наибольшие внутренние усилия. Последовательное рассмотрение семи положений рабочего оборудования, описываемых в классической литературе по одноковшовым экскаваторам [18-20], при построении цифровых моде-



Рис. 1. Схема многоуровневого моделирования силовых конструкций рабочего оборудования карьерного экскаватора
Fig. 1. Scheme of multilevel modeling of load bearing structures of working equipment of a quarry excavator

лей нагруженности следует интерпретировать как дискретизацию пространственных положений машины в течение цикла экскавации.

Декомпозиция силовых конструкций рабочего оборудования экскаватора рассматривается с позиций многоуровневого подхода. При многоуровневом моделировании деформирования и разрушения в механике обычно в качестве верхнего рассматривают макроуровень. При этом исследуются процессы деформирования и разрушения, локализованные в макрообъемах – деталях и элементах конструкций, и знания получают относительно этих макрообъемов. Мы делаем акцент на то, что эти процессы определяются связями и взаимодействиями элементов в составе сложной системы. Тогда ис-

следования на макроуровне осуществляются под управлением информации о структуре, связях и взаимодействиях конструкций. Количественное исследование связей и взаимодействий дает возможность как изучать деформирование и разрушение в макрообъемах, так и прогнозировать поведение конструкции с учетом внутренних и внешних системных взаимодействий.

В силу сложности конструкции и большого количества связей и взаимодействий на системном уровне рассматриваются два подуровня (рис. 1).

На первом из них используется геометрически и структурно нелинейная стержневая модель, учитывающая все необходимые кинематические связи. На втором – линейные трехмерные модели узлов, учитывающие связи деталей, соответствующие неразъемным (сварным) соединениям. Далее следует традиционный макроуровень, на котором в физически нелинейной постановке могут рассматриваться процессы упругопластического деформирования, развития трещин и другие процессы деградации.

Все рассматриваемые модели построены для экскаватора ЭКГ-12,5 в программном комплексе ANSYS. В силу сложных кинематики и взаимодействия элементов оборудования для обеспечения адекватности оценок деформирования конструкции в стержневой модели предусмотрен ряд особенностей, которыми часто пренебрегают при численных расчетах карьерных экскаваторов. Весовые нагрузки отдельных механизмов и элементов оборудования (седловой подшипник, нагруженный ковш и т.п.) смоделированы сосредоточенными массами. Канаты (стреловые, подъемные, напорные, возвратные) смоделированы пружинами одностороннего действия, работающими только на растяжение (tension only). Эквивалентная жесткость пружин определена исходя из количества ветвей каната в полиспасте и расчетной продольной жесткости одного каната [21, 22]. Возможные смещения элементов оборудования относительно друг друга описаны соответствующими удерживающими и кинематическими связями. Они введены для моделирования поворота канатных блоков на осях, перемещения и поворота рукояти в седловом подшипнике, шарнирного соединения металлоконструкций двуногой стойки, стрелы и подкосов. Разработанная на подуровне 1 стержневая модель содержит 14 односторонних связей (канатов), 1 поступательную и 18 вращательных кинематических пар. Адекватность разработанной геометрически и структурно нелинейной численной модели апробирована в широком диапазоне положений рабочего оборудования и сил сопротивления забоя копанью.

Построение цифровой модели нагруженности силовых конструкций для подуровня 1 системного уровня путем проведения вычислительных экспе-

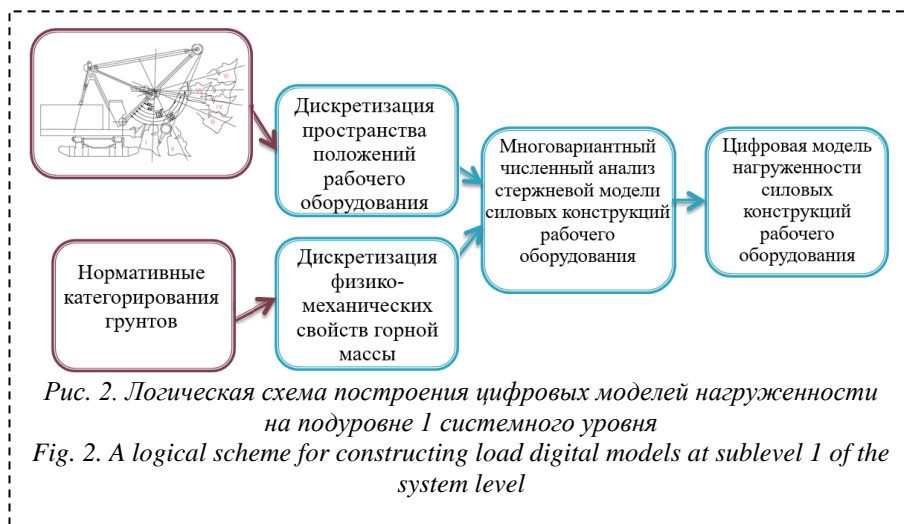


Рис. 2. Логическая схема построения цифровых моделей нагруженности на подуровне 1 системного уровня

Fig. 2. A logical scheme for constructing load digital models at sublevel 1 of the system level

риментов заключалось в многовариантном численном анализе стержневой модели с варьированием ее геометрии в соответствии с рассматриваемым множеством рабочих положений, и нагружением крайней точки рукояти (место крепления ковша) силами, варьировавшимися в зависимости от удельного сопротивления копанью. Последняя величина, в свою очередь, принимала дискретные значения в соответствии с рассматриваемым множеством категорий разрабатываемой горной массы (рис. 2). В ходе каждого вычислительного эксперимента определялись усилия (нагруженность) P_{ji} в каждом i -м силовом элементе конструкции, а также усилия P_{cj} в каждой j -й силовой связи между элементами конструкции. Под силовой связью подразумевается механическое взаимодействие элементов системы, сопровождающееся передачей силового потока (усилий и моментов) между ними. Тогда цифровая модель нагруженности для подуровня 1 системного уровня представляется множеством

$$\{P_{aikl}; P_{cjk}\}, i = 1, I, j = 1, J, k = 1, K, l = 1, L,$$

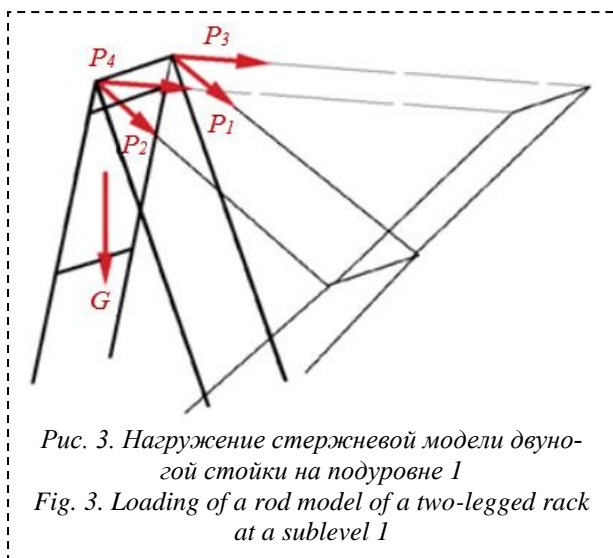
где P_{aikl} , P_{cjk} – нагруженность соответственно i -го силового элемента и j -й силовой связи в k -м положении рабочего оборудования при разработке горной массы l -й категории. Таким образом, цифровая модель представляет собой структурированный массив данных о нагруженности элементов и связей стержневой модели для дискретизированных положений рабочего оборудования и свойств горной массы.

На подуровне 2 системного уровня при разработке численных моделей узлов основывается на естественной декомпозиции каждой конструкции – представлении ее в виде множества деталей, соединяемых неразъемными соединениями. Количество и конфигурация деталей определяются конструкторской документацией. Их объединение в единую силовую систему осуществляется с использованием специальных граничных условий – связей (подробное описание соответствующей технологии предложено в [23, 24]), в которых по результатам численного анализа могут быть определены силовые реакции. Эти реакции характеризуют силовой поток, воспринимаемый соответствующей связью. При реализации такого подхода модель двуногой стойки содержит 50 деталей и 82 связи, нижней

секции стрелы – 36 деталей и 109 связей, верхней секции стрелы – 38 деталей и 109 связей (рис. 1).

Далее, рассматривая конструкции узлов как линейные системы, цифровые модели строим на основании принципа суперпозиции сил. Это позволяет использовать следующий прием. Рассматривая комплекс действующих переменных нагрузок, последовательно каждой из них присваиваем единичное значение и оцениваем соответствующие значения реакций в связях-соединениях. Получаемую таким образом систему коэффициентов – реакцию на единичные воздействия – можно рассматривать как цифровую модель нагруженности связей узла. Тогда для произвольной комбинации значений действующих нагрузок нагруженность связи (для узлов – нагруженность сварных соединений) определится суммой произведений действующих нагрузок на соответствующие коэффициенты цифровой модели. Поясним эти общие рассуждения следующим примером.

Двуногая стойка испытывает нагружение собственным весом G , усилиями P_1 и P_2 со стороны



подкосов, P_3 и P_4 со стороны стреловых канатов (рис. 3). На подуровне 2 двуногая стойка моделируется трехмерными телами, соединяемыми жесткими связями. Так, связь 1 соединяет трубу 1 и отливку 2, связь 2 – трубу 3 и отливку 4 (рис. 4). При произвольном нагружении двуногой стойки в каждой из связей в соответствии с ассоциированными с ними локальными системами координат возникают реакции R_x, R_y, R_z . При действии только силы тяжести ($P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 0$) в каждой связи возникают реакции R_x^G, R_y^G, R_z^G . При действии единичной силы P_1 ($P_1 = 1, P_2 = P_3 = P_4 = 0, G = 0$) в каждой связи возникают реакции $R_x^{P_1=1}, R_y^{P_1=1}, R_z^{P_1=1}$. Аналогичные реакции возникают от единичных сил $P_2,$

P_3, P_4 . Тогда цифровая модель нагруженности каждой связи (сварного соединения) двуногой стойки в общем виде дается таблицей 1 (количество рассматриваемых сил P определяется для каждого узла индивидуально из анализа совместной работы узлов в составе механической системы).

Цифровая модель нагруженности на подуровне

Таблица 1. Общий вид цифровой модели нагруженности силовой связи двуногой стойки
 Table 1. A general view of the load digital model of load bearing connection of a two-legged rack

Реакции	Воздействие				
	G	$P_1=1$	$P_2=1$	$P_3=1$	$P_4=1$
R_x	R_x^G	$R_x^{P_1=1}$	$R_x^{P_2=1}$	$R_x^{P_3=1}$	$R_x^{P_4=1}$
R_y	R_y^G	$R_y^{P_1=1}$	$R_y^{P_2=1}$	$R_y^{P_3=1}$	$R_y^{P_4=1}$
R_z	R_z^G	$R_z^{P_1=1}$	$R_z^{P_2=1}$	$R_z^{P_3=1}$	$R_z^{P_4=1}$

1 для конкретных положения рабочего оборудования и категории грунта содержит конкретные значения воздействий P_1, P_2, P_3, P_4 на двуногую стойку. Тогда нагруженность каждой связи на подуровне 2 в общем виде определится по формулам

$$\begin{aligned}
 F_x &= R_x^G + P_1 R_x^{P_1=1} + P_2 R_x^{P_2=1} + P_3 R_x^{P_3=1} + P_4 R_x^{P_4=1}; \\
 F_y &= R_y^G + P_1 R_y^{P_1=1} + P_2 R_y^{P_2=1} + P_3 R_y^{P_3=1} + P_4 R_y^{P_4=1}; \\
 F_z &= R_z^G + P_1 R_z^{P_1=1} + P_2 R_z^{P_2=1} + P_3 R_z^{P_3=1} + P_4 R_z^{P_4=1}.
 \end{aligned}$$

В конкретных числах фрагмент (для двух связей двуногой стойки) цифровой модели нагруженности на подуровне 2 системного уровня показан в таблице 2.

Совместное использование моделей системного уровня заключается в том, что на основе принципа суперпозиции сил суммируются весовые воздействия и произведения усилий в связях из цифровых моделей подуровня 1 и реакций в связях цифровой модели подуровня 2. Конкретизируем эти рассуждения следующим примером. Для одного из положений рабочего оборудования (рукоять на максимальном вылете и находится приблизительно в горизонтальном положении) из цифровой модели подуровня 1 следуют значения усилий со стороны подкосов на двуногую стойку $P_1 = P_2 = 563$ кН, а со стороны стреловых канатов на двуногую стойку – $P_3 = P_4 = 615$ кН. Подставляя эти значения и коэффициенты из таблицы 2 в формулы 1, получим следующие значения усилий в связи 1 (рис. 4):

$$F_x = -29721,0 - 4,18 \cdot 10^{-2} \cdot 563 - 1,49 \cdot 5 -$$

Таблица 2. Фрагмент цифровой модели нагруженности связей двуногой стойки (усилия, Н).
Table 2. A fragment of a digital model of the loading of bindings of a two-legged rack (forces, N).

Реакции	Воздействие				
	G	$P_1=1 \text{ Н}$	$P_2=1 \text{ Н}$	$P_3=1 \text{ Н}$	$P_4=1 \text{ Н}$
Связь 1					
R_x	-29721,0	$-4,18 \cdot 10^{-2}$	-1,49	$-3,99 \cdot 10^{-2}$	-1,19
R_y	55,1	$6,30 \cdot 10^{-3}$	$-6,03 \cdot 10^{-3}$	$6,09 \cdot 10^{-3}$	$-5,94 \cdot 10^{-3}$
R_z	934,4	$5,68 \cdot 10^{-10}$	$4,75 \cdot 10^{-8}$	$9,40 \cdot 10^{-9}$	$6,51 \cdot 10^{-8}$
Связь 2					
R_x	9,3	$3,98 \cdot 10^{-3}$	$-4,15 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$-1,05 \cdot 10^{-2}$
R_y	1219,6	$-8,63 \cdot 10^{-3}$	$8,08 \cdot 10^{-3}$	$-1,05 \cdot 10^{-2}$	$9,77 \cdot 10^{-3}$
R_z	-3878,2	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$3,54 \cdot 10^{-3}$	$2,61 \cdot 10^{-3}$	$3,28 \cdot 10^{-3}$

$$-3,9 \cdot 10^{-2} \cdot 615 - 1,19 \cdot 615 = -1\,648 \text{ кН};$$

$$F_y = 55,1 + 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot 563 - 6,03 \cdot 10^{-3} \cdot 563 + 6,09 \cdot 10^{-3} \cdot 615 - 5,94 \cdot 10^{-3} \cdot 615 = 0,299 \text{ кН};$$

$$F_z = 934,4 + 5,68 \cdot 10^{-10} \cdot 563 + 4,75 \cdot 10^{-8} \cdot 563 + 9,4 \cdot 10^{-9} \cdot 615 + 6,51 \cdot 10^{-8} \cdot 615 = 0,934 \text{ кН}.$$

Рассматриваемый подход дает информацию об уровне нагруженности всех связей в механической системе, что, в свою очередь, определяет граничные условия для решения задач анализа деформирования и разрушения в макрообъемах деталей и элементов конструкций при переходе на макроуровень. Таким образом, построенные цифровые модели нагруженности можно дополнительно интерпретировать одновременно как цифровые модели граничных условий для задач, решаемых на макроуровне, и как цифровые модели силовых потоков в сложной механической структуре.

Многоуровневые цифровые модели нагружен-

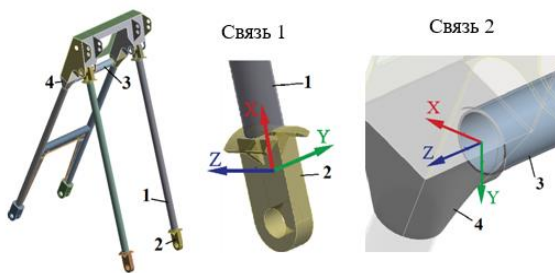


Рис. 4. Связи в соединениях труб 1, 3 и отливок 2, 4
Fig. 4. Connections in joints of tubes 1, 3 and castings 2, 4

ности на стадии проектирования могут быть использованы следующим образом. Поиск максимумов усилий в связях и узлах по цифровым моделям подуровня 1 системного уровня позволяет реализовать индивидуализированный подход к обоснованию расчетных случаев нагружения для каждого

узла как структурной единицы сложной конструкции. Определение реакций в связях по цифровым моделям подуровня 2 является предпосылкой к индивидуализированным расчетам и обеспечению прочности сварных соединений.

На стадии эксплуатации совместное использование цифровых моделей нагруженности подуровня 1 и макроуровня, и результатов мониторинга условий эксплуатации позволяет реализовать для каждого узла каждой машины получение расчетных оценок расходования ресурса для совершенствования планирования и управления ремонтами парка оборудования. Этот подход основан на классических знаниях о накоплении повреждений при нерегулярном нагружении, но обеспечивает более высокую точность оценок ресурса и управления техническим состоянием за счет возможности учета фактической нагруженности узлов и деталей.

Таким образом, в целях информационной поддержки жизненного цикла предложен и апробирован вариант построения многоуровневых цифровых моделей нагруженности силовых конструкций рабочего оборудования карьерного экскаватора на системном уровне взаимодействия их элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М. : Мир, 1973. 344 с.
2. Kurkin E. I., Sadykova V. O. Application of short fiber reinforced composite materials multilevel model for design of ultra-light aerospace structures // Procedia Engineering, 2017. № 185. P. 182-189.
3. Chen Y., Zhai J., Han Q. Multilevel finite element modeling and coupling vibration analysis of the drum in blade-disk-drum assembly // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 2017, № 5. P. 998-1011.
4. Schotte J.-S., Ohayon R. Various modelling levels to represent internal liquid behavior in the vibration

analysis of complex structures // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2009. Volume 198. Issue 21-26. P. 1913-1925.

5. Кочергин М. И., Торгаева Д. С., Сухоруков М. П., Дмитриев В. М., Шурыгин Ю. А. Многоуровневое моделирование физико-технических задач на примере глубинного насоса // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники 2019. Том 22. № 3. С. 79-86.

6. Рейзунт Е. М. Многоуровневая модель сегмента зеркала параболической антенны для анализа чувствительности силовых характеристик к конструктивным факторам // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18) С. 124-133.

7. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016. 138 с.

8. Lasi H., Kemper H-G. Industry 4.0 // Business & Information Systems Engineering. 2014. № 4. P. 239-242.

9. Прохоров А., Коник Л. Цифровая трансформация. М.: ООО «АльянсПринт», 2019. 368 с.

10. Jazdi N. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0 // IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. 2014.

11. Lovas R., Farkas A., Marosi A.Cs., Acs S., Kovacs J., Szaloki A., Kadar B. Orchestrated platform for cyber-physical systems // Complexity, vol. 2018. Article ID 8281079. 16 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8281079>.

12. A hierarchical digital twin model framework for dynamic cyber-physical system design // Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering. February 2019. P. 123-129.

13. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the digital twin: a systematic literature review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. May 2020. P. 36-52.

14. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. М.: ООО «АльянсПринт». 2020. 401 с.

15. Revetria R., Tonelli F., Damiani L., Demartini M. A Real-Time Mechanical Structures Monitoring System Based On Digital Twin, IOT and Augmented

Reality // Conference: 2019 Spring Simulation Conference (SpringSim). April 2019.

16. Ritto T.G., Rochinha F.A. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. № 6.

17. Song C., Liu Z., Long B., Yang C.L. Real-Time Prediction Method for Performance Degradation Trend Based on Reliability Experimental Data // Applied Mechanics and Materials. Volumes 321-324. P. 757-761.

18. Домбровский Н. Г., Гальперин М. И. Строительные машины (в 2-х ч.). Ч. II. М.: Высшая школа, 1985. 224 с.

19. Крутиков И. П. Экскаваторы. М.: Машиностроение, 1964. 389 с.

20. Петерс Е. Р. Основы теории одноковшовых экскаваторов. М.: Машгиз, 1955. 260 с.

21. Рекомендации по выбору типов и расчету прочности стальных канатов, применяемых в строительных металлических конструкциях. М.: ЦНИИПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ им. Мельникова, 1991. 33 с.

22. РД 03-439-02. Инструкция по эксплуатации стальных канатов в шахтных стволах. М.: НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2002. 216 с.

23. Doronin S. V., Alshanskaya A. A. Estimation of Weld Load in Predicting the Service Life of Complex Structures // AIP Conference proceedings: MECHANICALS, RESOURCE AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS AND STRUCTURES (MRDMS-2020): Proceeding of the 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structure, 2020, Vol. 2315. P. 020015-1 - 020015-4.

24. Альшанская А. А., Доронин С. В. Индивидуализированная оценка нагруженности сварных соединений двуногой стойки карьерного экскаватора / Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2020. Сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции, 24-25 ноября 2020 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: А. А. Хорешок (отв. редактор), В. А. Колмаков [и др.]. – Кемерово, 2020. С. 402.1-402.6

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Об авторах:

Доронин Сергей Владимирович, Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, (660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 53), Сибирский федеральный университет, (660025, Россия, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95), кандидат техн. наук, доцент

Альшанская Анна Александровна, аспирант, ст. преподаватель, Сибирский федеральный университет, (660025, Россия, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95), alshanskaya_anna@inbox.ru

Герасимова Татьяна Александровна, Сибирский федеральный университет, (660025, Россия, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95), кандидат техн. наук, доцент

Заявленный вклад авторов:

Доронин С.В. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы.
Альшанская А.А. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы.
Герасимова Т.А. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-2-58-65

Sergey V. Doronin^{1,2}, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Anna A. Alshanskaya**^{2,*}, Graduate Student, Senior Lecturer, **Tat'yana A. Gerasimova**², C. Sc. in Engineering, Senior Lecturer

¹ Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies

² Siberian Federal University

*E-mail: alshanskaya_anna@inbox.ru

MULTILEVEL DIGITAL MODELS OF THE LOADS ON THE LOAD BEARING STRUCTURES OF THE WORKING EQUIPMENT OF THE QUARRY EXCAVATOR

Abstract.

A multi-level approach is proposed for evaluating the loads of the load bearing structures of a quarry excavator based on a sequential numerical analysis of structurally and geometrically non-linear bar models of metal structures and working equipment. Three-dimensional linear models of welded nodes and physically non-linear component models. The loading characteristics are digitized as a result of multi-variant computational experiments on the analysis of stress-deformed state of structures for discrete positions of working equipment in space and discrete values of ground resistance to digging. Digital load models are structured datasets of force factors operating in all elements of the structure, components, components, machine joints in the discretized positions of the working equipment and the ground resistance to digging. In order to provide information support for the life cycle using multilevel digital load models, prerequisites have been created for the implementation of an individualized approach to the justification of calculated load cases for each node, to obtain estimates and ensure the strength of welds, to predict the build-up of damage and to predict the residual life of individual parts to control the condition. The implementation of this approach is aimed at reducing the number of failures and accidents and increasing the reliability of the fleet of excavators.



Article info

Received:

14 December 2021

Accepted for publication:

15 March 2022

Accepted:

15 May 2022

Keywords: quarry excavator, working equipment, load, digital models, system approach.

For citation: Doronin S.V., Alshanskaya A.A., Gerasimova T.A. Multilevel digital models of the loads on the load bearing structures of the working equipment of the quarry excavator. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2022; 2(160):58-65 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-2-58-65

REFERENCES

1. Mesarovich M., Mako D., Takahara I. *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem*. M.: Mir; 1973. 344 p.
2. Kurkin E.I., Sadykova V.O. Application of short fiber reinforced composite materials multilevel model for design of ultra-light aerospace structures. *Procedia Engineering*, 2017; 185:182-189.
3. Chen Y., Zhai J., Han Q. Multilevel finite element modeling and coupling vibration analysis of the drum in blade-disk-drum assembly. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2017; 5:998-1011.
4. Schotte J.-S., Ohayon R. Various modelling levels to represent internal liquid behavior in the vibration analysis of complex structures. *Computer Methods in*

Applied Mechanics and Engineering. 2009; 198(21-26): 1913-1925.

5. Kochergin M.I., Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Dmitriev V.M., Shurygin Yu.A. *Mnogourovnevoe modelirovanie fiziko-tekhnicheskikh zadach na primere glubinnogo nasosa. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* 2019; 22(3):79-86.

6. Reizmunt E.M. *Mnogourovnevaya model segmenta zerkala parabolicheskoi anteny dlya analiza chuvstvitelnosti silovykh kharakteristik k konstruktivnym faktoram. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii*. 2020; 2(18):124-133.

7. Shvab K. Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya. M.: Eksmo, 2016. 138 p.

8. Lasi H., Kemper H-G. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*. 2014;4:239-242.

9. Prohorov A., Konik L. Cifrovaya transformatsiya. M.: OOO «Al'yansPrint»; 2019. 368 p.

10. Jazdi N. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*. 2014.

11. Lovas R., Farkas A., Marosi A.Cs., Acs S., Kovacs J., Szaloki A., Kadar B. Orchestrated platform for cyber-physical systems. *Complexity* 2018. 2018; 8281079:16 pages, <https://doi.org/10.1155/2018/8281079>.

12. A hierarchical digital twin model framework for dynamic cyber-physical system design. *Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*. 2019:123-129.

13. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the digital twin: a systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020; 36-52.

14. Prokhorov A., Lysachev M. Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoi opyt. Izdanie pervoe, ispravlennoe i dopolnennoe. M.: OOO «Al'yansPrint»; 2020. 401 p.

15. Revetria R., Tonelli F., Damiani L., Demartini M. A Real-Time Mechanical Structures Monitoring System Based On Digital Twin, IOT and Augmented Reality. *Conference: 2019 Spring Simulation Conference (SpringSim)*. 2019.

16. Ritto T.G., Rochinha F.A. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021; 6.

17. Song C., Liu Z., Long B., Yang C. L. Real-Time Prediction Method for Performance Degradation

Trend Based on Reliability Experimental Data. *Applied Mechanics and Materials*. 321-324:757-761.

18. Dombrovskii N.G., Galperin M.I. Stroitelnye mashiny (v 2-kh ch.). Ch. II. M.: Vysshaya shkola; 1985. 224 p.

19. Krutikov I.P. Ekskavatory. M.: Mashinostroenie; 1964. 389 p.

20. Peters E.R. Osnovy teorii odnokovshovykh ekskavatorov. M.: Mashgiz, 1955. 260 p.

21. Rekomendatsii po vyboru tipov i raschetu prochnosti stalnykh kanatov, primenyaemykh v stroitelnykh metallicheskiykh konstruksiyakh. M.: TSNIIPROEKTSTALKONSTRUKTSIYa im. Melnikova; 1991. 33 p.

22. RD 03-439-02. Instruksiya po ekspluatatsii stalnykh kanatov v shakhtnykh stvolakh. M.: NTTs po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii; 2002. 216 p.

23. Doronin S.V., Alshanskaya A.A. Estimation of Weld Load in Predicting the Service Life of Complex Structures. *AIP Conference proceedings: Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS-2020): Proceeding of the 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structure 2020*; 2315:020015-1-020015-4.

24. Alshanskaya A.A., Doronin S.V. Individualizirovannaya otsenka nagruzhennosti svarnykh soedinenii dvunogoi stoiki karernogo ekskavatora. *Prirodnye i intellektualnye resursy Sibiri. Sibresurs 2020. Sbornik materialov KhVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 24-25 noyabrya 2020 g., Kemerovo [Elektronnyi resurs] / FGBOU VO «Kuzbas. gos. tekhn. un-t im. T. F. Gorbacheva»*; redkol.: A.A. Khoreshok (otv. redaktor), V.A. Kolmakov [i dr.]. Kemerovo, 2020; 402.1-402.6

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Sergey V. Doronin, Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, (660049, Russia, Krasnoyarsk, pr. Mira, 53), Siberian Federal University, (660025, Russia Россия, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 95), C. Sc. in Engineering, Associate Professor,
Anna A. Alshanskaya, Postgraduate Student, Senior Lecturer, Siberian Federal University, (660025, Russia Россия, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 95), alshanskaya_anna@inbox.ru
Tat'yana A. Gerasimova, Senior Lecturer, Siberian Federal University, (660025, Russia Россия, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 95), C. Sc. in Engineering

Contribution of the authors:

Sergey V. Doronin, Anna A. Alshanskaya, Tat'yana A. Gerasimova - research problem statement; scientific management; conceptualisation of research; writing the text, drawing the conclusions, data collection; reviewing the relevant literature.

All authors have read and approved the final manuscript.

