

Анализ основных аспектов формализации процедур системного проектирования экскаваторов на предпроектном этапе

© В.П. Павлов¹, П.А. Побегайло²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660074, Россия

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 101000, Россия

Рассмотрены основные аспекты формализации процедур проектирования одноковшовых экскаваторов в интегрированной среде. Выявлены особенности построения методологии, математических моделей и программных средств проектирования, а также роль и возможности разработчика в принятии решений. Композицией нелинейных алгебраических уравнений представлена модель структурно-компоновочного проектирования одноковшовых экскаваторов, в которой взаимосвязи линейных параметров, масс агрегатов и др. выражены в функции главного параметра машины или заданы на основе закономерностей изменения прочностных характеристик несущей конструкции и требований к устойчивости машины. Для анализа геометрических свойств рабочего оборудования экскаватора предложено использовать метод вложенных сфер как основу построения критериального пространства.

Ключевые слова: проектирование, одноковшовые экскаваторы, компьютерный анализ, формализация процедур

Введение. В современных методах и средствах проектирования одноковшовых экскаваторов (ОЭ) необходимо учитывать связь с элементами всего жизненного цикла изделия. Проектирование следует осуществлять в интегрированной среде на базе ИПИ/CALS-стандартов; математические модели и программные средства должны отражать междисциплинарный характер используемой методологии [1–8].

В рамках настоящей работы будем полагать, что разрабатываемый проект машины расширенно трактуется как полная совокупность данных, специфицирующих проект ОЭ в различных информационных проекциях или аспектах [9]. Необходимо обратить внимание также на хронологический аспект современного проектирования. Технология компьютерного анализа вносит определенные коррективы в представления о конструкторско-технологической подготовке производства (КТПП) (рис. 1). Поэтому этапы КТПП, определенные ЕСКД, несколько отличаются от аналогичных этапов, принятых в международной практике. В определенной степени это затрудняет понимание методов и технологий проектирования.

В практике современного проектирования ОЭ возникают как рутинные, так и творческие задачи, которые могут быть алгоритмизированы лишь в отдельных случаях. Область возможных альтернатив здесь определяется оператором или лицом, принимающим решение (ЛПР).

Стадии КТПП	Этапы КТПП						
ГОСТ 2.002–72, 2.102–2013 2.103–2013	ТЗ	Проектирование			Разработка РД		Производство
	ТЗ	ТП	Эскиз Проект	Технический проект Испытание макетов	РД на опытные образцы	Изготов- ление опытных образцов	РД на опытную партию
Между- народная практика	Планирование	Разработка концепции и системное проектирование	Проектирование продукта и планирование ТП		Пилотное производство		
			Испытания макетов	Изготовление прототипов			
	Проектирование ценностей					Производство	
Этапы разработки новой продукции (международная практика)							

Рис. 1. Стадии конструкторско-технологической подготовки производства (терминологическое соответствие российских стандартов и международной практики): ТЗ — техническое задание; РД — рабочая документация; ТП — технологическая подготовка

Исследование процессов постановки задач, разработки сложных проектов позволили выделить особую роль человека в сохранении целостности при расчленении проблемы, системы ценностей и критериев принятия решений. Фактически проектные задачи являются задачами принятия решений в условиях нечеткости, определяемой как нечеткой постановкой самой задачи, так и использованием интуитивных представлений экспертов, путях их решения и нечетком описании параметров ОЭ. Отмеченные особенности обуславливают многоуровневые модели и многоаспектные подходы к проектированию.

Цель работы — проведение анализа основных методологических аспектов такого подхода применительно к ОЭ с гидравлическим приводом.

Формализация проекта. Процесс проектирования представим как элемент жизненного цикла машины. В соответствии с принципами системного анализа внешними условиями (реакциями) являются: ТЗ на проектирование X_0 и возможности производства Z_0 .

В формализованном виде задача формирования рационального проекта (П) ОЭ представлена в виде следующего кортежа [1, 2, 10 и др.]:

$$\Pi = \langle X_0, Z_0, \Omega_0, V_0, D_x, Y_0, F_0, W_0, \bar{x} \rangle, \quad (1)$$

где X_0 — множество задач, возлагаемых на ОЭ (ТЗ); Z_0 — условия реализуемости проекта, учитывающие имеющуюся производственную базу и достигнутый научно-технический уровень; Ω_0 — множе-

ство рассматриваемых концепций проекта; V_0 — формальное правило, выделяющее из множества рассматриваемых вариантов допустимые варианты; D_x — множество допустимых вариантов проекта; Y_0 — вектор критериев, оценивающих предпочтительность допустимых вариантов проекта; F_0 — правило, ставящее в соответствие каждым $\{x, X_0, Z_0\}$ значения вектора критериев; W_0 — правило выбора наиболее обоснованного варианта проекта из множества допустимых; \bar{x} — рациональный вариант проекта.

Принцип поиска «оптимального» решения заменен принципом поиска «наиболее обоснованного» решения (субоптимизацией). Поэтому проект П окружен набором эвристических процедур, входящих в информационно-логическую модель проектирования.

Некоторое частное относительно кортежа (1) проектное решение (для определенной концепции ОЭ) можно представить в виде

$$PR = L(M_i, \psi, E_x, P_p). \quad (2)$$

Здесь M_i — оператор, связывающий модельные параметры физического процесса; ψ — оператор, связывающий структурно-компоновочные решения (например, развесовку экскаватора) с параметрами и критериями эффективности; E_x — множество баз знаний, построенных, например, в системе продукций,

$$E_x = \left\{ \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_i : \pi_i = \hat{f}_{i1} \wedge \hat{f}_{i2} \wedge \dots \wedge \hat{f}_{id} \right\},$$

где π_i — i -я база знаний — множество правил (продукций), включающих множество фактов \hat{f}_{i1} i -й продукции; P_p — множество неавтоматизированных процедур.

Таким образом, в условиях максимально возможной автоматизации проектных процедур обеспечена возможность привлечения различных видов расчетных моделей, баз данных и знаний (прецедентов). Причем кортеж (2) следует рассматривать как наиболее реалистичную форму проекта, допускающую любую степень приближения к виду (1).

Метод компьютерного моделирования. Проведенный анализ существующих подходов к синтезу моделей конструкций и физических процессов показал, что метод синтеза проектных решений должен оперировать с моделями различных классов [8]. В каждом классе моделей сформировались лидеры в поставке САЕ-систем. Ведение важнейших компонентов проекта П возлагается на ЛПП.

Схема метода моделирования характеристик ОЭ (рис. 2) ориентируется на автоматизацию двух наиболее сложных эвристических процедур: формализацию конструкции с точки зрения исследуемого процесса (выделение в геометрической модели ОЭ множеств извест-

ных и неизвестных конструкторско-технологических решений); формализацию ряда моделей для выделенных множеств конструкторско-технологических решений (например, в элементах рабочего оборудования при оценке напряженно-деформируемого состояния; при проектировании гидроагрегатов поворотной платформы с нетрадиционной развесовкой машины; при анализе воздухопроводов в подкапотном пространстве и т. п.) [2].

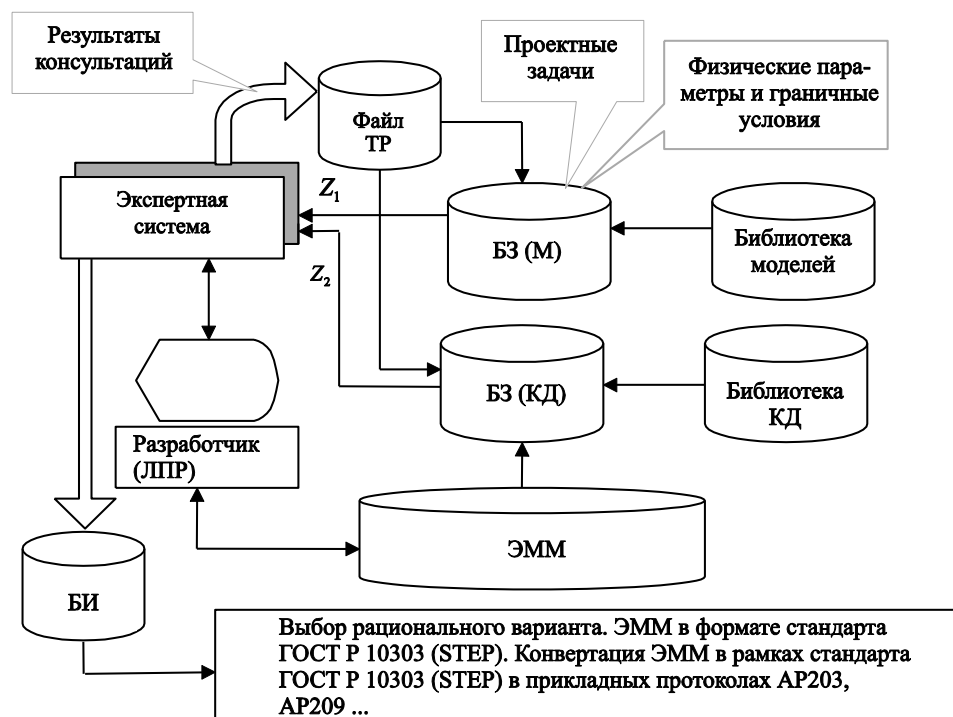


Рис. 2. Схема метода моделирования характеристик конструкции и приводных систем машины в компьютерной среде проектирования:

БЗ (М) — база знаний (модель) по синтезу математических моделей из набора моделей 1-го и 2-го классов; БЗ (КД) — база знаний (конструкторская документация) по распознаванию конструкторских решений; файл ТР – файл с техническими решениями (агрегаты, элементы), моделями и процедурами; БИ – блок интерпретации (распознавание, визуализация, интерпретация, управляющая информация); ЭММ — электронный макет машины

Формализация знаний. Процесс экспертного анализа процедур проектирования выполняется в рамках метода синтеза средствами экспертной системы, использующей базы знаний, эти средства состоят из конечного множества продукций (правил) и конечных множеств фактов. Продукции π_i в базах знаний являются независимыми и устанавливаются для любого множества фактов \hat{F} . Факты, в свою очередь, могут являться взаимосвязанными, создавать единое знание из не-

скольких фактов ($\hat{P}_i: \hat{f}_{i1} \wedge \hat{f}_{i2} \wedge \dots \wedge \hat{f}_{id} \rightarrow \hat{F}$), что позволяет трансформировать простые знания в более сложные (метазнания). При обращении к экспертной системе разработчик получает выбранный из базы знаний запрос в формате

$$s_i = \hat{f}_{i1} \vee \hat{f}_{i2} \vee \dots \vee \hat{f}_{im}.$$

Операция исключающего «ИЛИ» (" \vee ") придает запросу характер альтернативного меню, в результате которого разработчик выбирает, например, диапазоны значений определенных параметров, описывающих конструкторско-технологическое решение в ОЭ, или соответствующую текущему моменту проектную задачу. База знаний осуществляет логический вывод, оперируя характерными признаками определенного конструктивного узла, конструктивного элемента или конструкции в целом. Такие признаки хранятся в справочном файле и описываются так же, как и модели, с помощью множества пар «объект – значение».

Адаптация ЛПР к задаче. Рассмотренные подходы не позволяют объективно выбирать наилучшее решение из множества допустимых. Поэтому необходим диалог, в процессе которого от ЛПР требуется получение дополнительной информации в виде весовых коэффициентов, условий предпочтения и т. д. В процессе диалога происходит взаимная адаптация ЛПР и ЭВМ. Эта адаптация ЛПР к задаче происходит в результате осмысления соотношения между своими потребностями и возможностями их достижения.

Трудность заключается в том, что ЛПР, как правило, априорно не осознает компромисс между своими потребностями, они у него изначально экстремальные, что и выражается в исходной постановке задачи. Компромисс образуется в результате реализации данного процесса и представляет собой адаптацию ЛПР к задаче. Также отметим дополнительные сложности, обусловленные тем, что такой диалог имеет полифонический характер (по М.М. Бахтину и др.), язык описания проекта ОЭ чаще всего не является оптимальным, а человек является сильно неоптимальным существом с точки зрения работы с потоками информации.

Слабо и плохо формализуемые проектные процедуры являлись и являются прерогативой ЛПР, в связи с чем роль ЛПР в принятии стратегических решений, в анализе моделей с компонентами неопределенности все более возрастает.

Поэтому любая серьезная и принципиальная ошибка, допущенная ЛПР на ранних стадиях проектирования ОЭ, далее уже практически не может быть устранена. Проще и дешевле в этом случае не перedelывать полученный вариант ОЭ (или весь проект), а создать новую машину заново.

Проектные процедуры и их реализация. На примере двух процедур покажем их использование в задачах предпроектного анализа рабочего оборудования экскаватора.

Процедура 1 (определение развесовки экскаватора). Известные модели определения массы ОЭ дают оценки параметров на основе регрессионных моделей, связывающих массу с одним из основных параметров машины. При этом основным параметром может быть прямой или косвенной характеристикой типоразмера ОЭ. Такие модели не определяют внутреннюю структуру машины и применимы только для конструктивно подобных машин.

Композицией нелинейных алгебраических уравнений представлена модель структурно-компоновочного проектирования ЭО, в которой взаимосвязь линейных параметров, масс агрегатов и др. выражена в функции главного параметра машины или задана на основе закономерностей изменения прочностных характеристик несущей конструкции, устойчивости машины [2].

В задачах компьютерного проектирования построение модели должно быть гибким, т. е. перестройка модели выполняется в зависимости от постановки задачи, а входные данные модели определяются выходными параметрами модели более высокого уровня. Основным отличием данного подхода является учет причинно-следственных связей в сочетании с регрессионным анализом влияния основных факторов.

Формально задача определения развесовки ЭО для входного вектора $A_3 = \{q, P_m, R_m, N_{дв}\}$ сводится к определению $G_3 = \{G_i, k_{ij}\}$; $X_3 = \{x_i\}$; $i = 1, 2, \dots, N$, где G_3 — вектор масс элементов экскаватора; X_3 — вектор линейных координат центров масс G_i . Элементы вектора A_3 определяют геометрические, прочностные и энергетические характеристики машины: q — вместимость основного ковша, P_m, R_m — максимальные сила и радиус копания, $N_{дв}$ — мощность двигателя [2]. Коэффициенты k_{ij} получены на основе анализа статистических данных. Для определения масс элементов конструкции применена гипотеза об изменении массы равнопрочного бруса, подверженного действию изгибающего момента (модели элементов оборудования m_2, m_6, m_7 в векторе G_3). Условие устойчивости экскаватора с оборудованием — обратная лопата обеспечивается необходимым весом противовеса (модель m_5).

Для наиболее высокого уровня иерархии входной вектор имеет вид $A_3 = \{q, P_m, R_m, N_{дв}\}$. Вычисление той или иной характеристики подсистемы ЭО, в частности критериев оценки проектных решений, может быть проведено с использованием различных моделей. Вначале могут использоваться модели, учитывающие лишь основные факторы, т. е. влияние которых на вычисляемые характеристики наиболее значительное, а затем по мере детализации проекта и расширения век-

тора x возможно применение более полных моделей. Так, при проектировании ЭО прочность и устойчивость на начальных этапах проектирования оценивают по приближенным формулам, а далее — на основе методов типа конечных элементов, для использования которых необходимо задание значительно большего числа переменных, описывающих проект ЭО. Очевидно, что применение этих методов возможно лишь после того, как проект достаточно детализирован и основная масса исходных данных известна (в виде решений, определенных на предыдущих уровнях).

Степень разукрупнения модели зависит от цели исследования, поэтому понятие элемента условно. Тем более, что даже в пределах одной исследовательской задачи ЭО может разукрупняться с заданной степенью детализации, а в процессе исследования (проектирования) часто необходимо изменить постановку задачи и ввести новые агрегированные модули. Поэтому рассматриваемая форма модели является декларативной, в основе которой лежит описание модели задачи, а не алгоритма ее решения. Модель специфицируется в виде неупорядоченной совокупности отношений, которые соответствуют связям, существующим между параметрами задачи. Эти отношения, называемые общим термином «ограничения», могут иметь вид уравнений, неравенств, логических выражений, символьных операторов и т. п. При этом постановка той или иной задачи конкретизируется путем добавления в модель ограничений на допустимые значения параметров и (или) дополнительных связей между ними.

Процедура 2 (оценка параметров рабочего оборудования). Известно, что на экскаваторах широко применяют сменное рабочее оборудование с изменяемыми кинематическими параметрами и ковшами различной вместимости. Поэтому декомпозиция расчетной модели связана не только (и не столько) с увеличением числа компонентов модели, но и с введением новых отношений между ними. Эти новые отношения должны быть увязаны с новыми закономерностями развития параметров для учета инноваций, направленных на применение новых конструкторских решений, новых приводных схем с компонентами автоматики и т. п.

В ходе работы над проектом ОЭ проектировщик имеет некоторое множество вариантов конструкций и механизмов конечной мощности. При этом проектное пространство параметров может возрасти лавинообразно, недостаточно исследован вопрос о сложности процесса проектирования (это может быть сделано на основании применения теории колмогоровской сложности), не используются разного рода оценки качества вариантов создаваемой конструкции (они должны быть органично встроены в структуру проектных расчетов и стыковаться друг с другом).

В качестве примера отметим, что на этапе анализа геометрических свойств рабочего оборудования ОЭ авторами предложены на основании теоремы Ли—Янга и критериев Л.И. Слуцкого показатели экскавации в рамках малого рабочего цикла ОЭ. В многокритериальной постановке задача проектирования сводится к свертке критериев (несмотря на известную критику такого подхода).

Для этого предложен метод вложенных сфер (возможно использование и других подходов). Если для простоты ограничиться тремя показателями качества, то его содержательную суть можно выразить следующим образом:

$$\sqrt{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2} = AB_i = S_i \rightarrow 0,$$

где параметры K_1 , K_2 и K_3 есть некоторые нормированные оценки качества (они образуют трехмерное критериальное пространство и соответствующее пространство параметров ОЭ); AB_i — радиус-вектор сферы, построенной на осях K_1 , K_2 и K_3 для каждого из рассматриваемых вариантов; S_i — энтропия (геометрическая мера оценки эффективности варианта конструкции).

Таким образом, имеется набор сфер с разным значением энтропии для всех имеющихся вариантов конструкции. Отсюда процесс поиска подходящего варианта ОЭ есть процесс коллапса пространств (сфер) состояний ОЭ, обеспечивающий схлопывание сфер по направлению к наименьшей.

Полномасштабное внедрение этого подхода позволит, с одной стороны, проводить ранжирование вариантов конструкции (сводя его к одному и тому же показателю, что, несомненно, очень удобно), а с другой — разобраться с имеющимися локальными оценками и выбрать из них наиболее подходящие.

Отметим, что в основе представления знаний в системах проектирования используют декларативную модель знаний (или спецификацию некоторого множества задач), представленную в виде семантической сети, вершинам которой сопоставляются денотаты (поименованные элементы) рассматриваемой предметной области, а дугам — отношения между ними. В связи с этим можно на множестве подсистем и параметров экскаватора, характеризующих его состояние, определить отношения с элементами базы знаний, являющейся неотъемлемой частью современных САПР.

Заключение. Разработанный подход к определению параметров экскаватора и способ представления моделей позволяют построить модульную структуру развесовки экскаватора, обеспечивающую следующие возможности:

- построение автономных и взаимосвязанных модулей программного обеспечения в системах проектирования;
- варьирование размерности задач на основе процедур агрегирования и разукрупнения в зависимости от решаемых задач;
- достаточно конструктивное проведение согласования и взаимной интерпретации результатов, полученных на различных моделях;
- осознанное нахождение компромиссных решений при распределении ресурсов, выделяемых на управление структурной динамикой (развесовкой) машины;
- осуществление одновременно синтеза функциональной и технической структур экскаватора в рамках одного формального описания рассматриваемой предметной области;
- обеспечение соответствия декларативной формы математической модели (в основе которой описание модели задачи, а не алгоритма ее решения) принципам представления знаний в системах проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Павлов В.П., Пенчук В.А. *Машины для земляных работ: синтез технологий, проектирование, эффективность*. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 2016, 328 с.
- [2] Павлов В.П. *Методология автоматизированного проектирования экскаваторов: модели, методы, технологии*. Saarbruchen, LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland (printed by Schaltungsdienst Lange o.H.G., Berlin), 2013, 336 p.
- [3] Павлов В.П., Побегайло П.А. Автоматизированное проектирование манипуляционного рабочего оборудования одноковшового гидравлического экскаватора. *Научные труды II Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении»*. В 2 т., т. 2. Москва, ИМАШ РАН, 2012, с. 120–122.
- [4] Побегайло П.А., Раков Д.Л. Задачи структурного синтеза на этапе выбора облика технических систем. *Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: XII Международная научно-техническая конференция. Чтения памяти В.Р. Кубачека*. Екатеринбург, УГГУ, 2014, с. 294–297.
- [5] Воронин И.П., Побегайло П.А., Раков Д.Л. Использование морфологического подхода при моделировании сложных технических систем и систем управления. *Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: XIV Международная научно-техническая конференция. Чтения памяти В.Р. Кубачека*. Екатеринбург, УГГУ, 2016, с. 309–312.
- [6] Побегайло П.А. *Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы: методология проектирования рабочего оборудования (на ранних стадиях проектирования)*. Москва, СВР-АРГУС, 2017, 210 с.
- [7] Побегайло П.А. Создание методологии автоматизированного проектирования горных и строительных роботов-манипуляторов (на примере одноковшовых гидравлических экскаваторов). *Аналитическая механика, устойчивость и управление: Труды XI Международной Четаевской конференции. Т. 4. Секция 4. Компьютерные технологии в науке, образовании, управлении производством*. Казань, КНИТУ-КАИ, 2017, с. 168–177.

- [8] Кузьмин П.К., Норенков И.П. *Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 320 с.
- [9] Стариков А.В., Харин В.Н. *Управление сложными проектами в интегрированных САПР*. Воронеж, ВГУ, 2002, 135 с.
- [10] Падалко С.Н., Пиявский С.А., Смирнов О.Л. *САПР: формирование и функционирование проектных модулей*. Москва, Машиностроение, 1987, 272 с.

Статья поступила в редакцию 26.12.2017

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Международной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики FARM–2017», посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24 – 27 октября 2017 г.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Павлов В.П., Побегайло П.А. Анализ основных аспектов формализации процедур системного проектирования экскаваторов на предпроектном этапе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1749>

Павлов Владимир Павлович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Транспортные и технологические машины» Сибирского федерального университета. Область научных интересов: моделирование рабочих процессов, конструкций и приводов землеройных машин. e-mail: petr214@yandex.ru

Побегайло Петр Алексеевич — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Область научных интересов: параметрический и структурный синтез технических систем.
e-mail: pvp20101@list.ru

Analysis of main aspects of procedure formalisation in systemic design of excavators at the pre-project stage

© V.P. Pavlov¹, P.A. Pobegaylo²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660074, Russia

² Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 101000, Russia

The article deals with basic aspects of design procedure formalisation concerning developing single-bucket excavators in an integrated environment. We outline specifics of putting together a methodology, mathematical models and computer-aided design software, as well as the role the developer plays in decision-making and the opportunities he or she has. A composition of non-linear algebraic equations represents the model for structure and configuration design of single-bucket excavators, in which the relationships between linear parameters, assembly masses and so on are expressed as functions of the main machine parameters or are defined through the requirements for machine stability and the laws describing how the strength properties of the framework change. We suggest using the method of nested spheres as the basis for constructing the criteria space in order to analyse geometrical properties of the excavator attachments.

Keywords: design, single-bucket excavators, computer analysis, procedure formalisation

REFERENCES

- [1] Pavlov V.P., Penchuk V.A. *Mashiny dlya zemlyanykh rabot: sintez tekhnologii, proektirovanie, effektivnost* [Earthwork machinery: technology synthesis, design, efficiency]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2016, 328 p.
- [2] Pavlov V.P. *Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya ekskavatorov: modeli, metody, tekhnologii* [Computer-aided excavator design methodology: models, methods, technologies]. Saarbruchen, LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland (printed by Schaltungsdienst Lange o.H.G., Berlin), 2013, 336 p.
- [3] Pavlov V.P., Pobegaylo P.A. Avtomatizirovannoe proektirovanie manipulyatsionnogo rabocheho oborudovaniya odnokovshovogo gidravlicheskogo ekskavatora [Computer-aided design of manipulator attachments for a single-bucket hydraulic excavator]. *Nauchnye trudy II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii Fundamentalnye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii* [Proc. of the 2nd International scientific conference on Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering]. In 2 vols. Vol. 2. Moscow, Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute (Russian Academy of Sciences) Publ., 2012, pp. 120–122.
- [4] Pobegaylo P.A., Rakov D.L. Zadachi strukturnogo sinteza na etape vybora oblika tekhnicheskikh sistem [Structural synthesis problems at the outline stages of engineering design]. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Chteniya pamyati V.R. Kubacheka* [Equipment for mining and oil and gas industries: 12th International scientific and engineering conference. V.R. Kubachek Memorial readings]. Yekaterinburg, URSMU Publ., 2014, pp. 294–297.
- [5] Voronin I.P., Pobegaylo P.A., Rakov D.L. Ispolzovanie morfologicheskogo podkhoda pri modelirovani slozhnykh tekhnicheskikh sistem i sistem upravleniya [Employing the morphological approach for simulating complex engi-

- neering and control systems]. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: XIV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Chteniya pamyati V.R. Kubacheka* [Equipment for mining and oil and gas industries: 14th International scientific and engineering conference. V.R. Kubachek Memorial readings]. Yekaterinburg, URSMU Publ., 2016, pp. 309–312.
- [6] Pobegaylo P.A. *Moshchnye odnokovshovye gidravlicheskie ekskavatory: metodologiya proektirovaniya rabocheho oborudovaniya (na rannikh stadiyakh proektirovaniya)* [Powerful single-bucket hydraulic excavators: attachment design methodology (at the early design stages)]. Moscow, SvR-ARGUS Publ., 2017, 210 p.
- [7] Pobegaylo P.A. *Sozdanie metodologii avtomatizirovannogo proektirovaniya gornyykh i stroitelnykh robotov-manipulyatorov (na primere odnokovshovykh gidravlicheskikh ekskavatorov)* [Developing a methodology for computer-aided design of mining and construction manipulator robots (using single-bucket hydraulic excavators as an example)]. *Analiticheskaya mekhanika, ustoychivost i upravlenie: Trudy XI Mezhdunarodnoy Chetaevskoy konferentsii* [Analytical mechanics, stability and control: Proc. of the 11th International Chetaev conference]. Vol. 4. Section 4. *Kompyuternye tekhnologii v nauke, obrazovanii, upravlenii proizvodstvom* [Computer technologies in science, education, production management]. Kazan, KNRTU-KAI Publ., 2017, pp. 168–177.
- [8] Kuzmin P.K., Norenkov I.P. *Informatsionnaya podderzhka naukoemkikh izdeliy. CALS-tekhnologii* [Information support for high-tech products. CALS technologies]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2002, 320 p.
- [9] Starikov A.V., Kharin V.N. *Upravlenie slozhnymi proektami v integrirovannykh SAPR* [Complex project management in integrated CAD systems]. Voronezh, Voronezh State University Publ., 2002, 135 p.
- [10] Padalko S.N., Piyavskiy S.A., Smirnov O.L. *SAPR: formirovanie i funktsionirovanie proektnykh moduley* [CAD systems: formation and operation of design modules]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 272 p.

Pavlov V.P., Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor. Professor, Department of Transport and Technological Machines, Siberian Federal University. Specialises in simulation of work cycles, structures and actuators of earthwork machinery. e-mail: petr214@yandex.ru

Pobegaylo P.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Senior Research Fellow, Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. Specialises in parametric and structural synthesis of engineering systems. e-mail: pvp20101@list.ru