

УДК (UDC) 621.86

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В ПРОЦЕССЕ СИНТЕЗА СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ ПОДЪЕМА ГРУЗА

APPLICATION OF A GENETIC ALGORITHM IN THE SYNTHESIS PROCESS OF STRUCTURAL DIAGRAMS OF LOAD-LIFTING MECHANISMS DRIVES

Гончаров К.А.
Goncharov K.A.Российский университет транспорта (Москва, Россия)
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Синтез структурной схемы привода механизма подъема груза любой грузоподъемной машины является нетривиальной и неформализованной инженерной задачей, опирающейся в своей основе на опыт проектировщика в вопросе подбора взаимодействующих в структуре привода узлов. Лишь во вторую очередь в данной проектной процедуре можно поставить значимость проводимых параллельно дополнительных компоновочных расчетов, легко поддающихся формализации и, как следствие, дальнейшей автоматизации. В настоящей статье предложено математическое решение процедуры формализации построения схем приводов механизма подъема и поиска наилучшей из них на основе одного из концептуальных решений при построении моделей искусственного интеллекта — метода создания новых решений в виде генетического алгоритма. Показаны особенности построения исходной популяции решений, кроссовера и мутации. Отдельный акцент сделан на необходимости определения сбалансированного вида функции приспособленности. Приведен сравнительный анализ качества синтезируемых решений в зависимости от применяемого количества эволюционных итераций при реализации генетического алгоритма в случае использования статических функций приспособленности.

Ключевые слова: механизм подъема груза, синтез структуры привода, генетический алгоритм, модели искусственного интеллекта.

Дата получения статьи: 29.09.2025
Дата принятия к публикации: 04.12.2025
Дата публикации: 25.12.2025

Сведения об авторе:

Гончаров Кирилл Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Российский университет транспорта, e-mail: goncharov_bgu@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5895-1162

Abstract. Synthesizing the structural diagram of a hoisting mechanism drive for any lifting machine is a non-trivial and non-formalized engineering task, relying primarily on the designer's experience in selecting the components interacting within the drive structure. Only secondary importance in this design procedure can be placed on the additional, parallel layout calculations, which are easily formalized and, consequently, further automated. This article proposes a mathematical solution for formalizing the construction of hoisting mechanism drive diagrams and searching for the best one. This solution is based on one of the conceptual solutions for constructing artificial intelligence models—a method for generating new solutions in the form of a genetic algorithm. The features of constructing the initial solution population, crossover, and mutation are demonstrated. Particular emphasis is placed on the need to define a balanced fitness function. A comparative analysis of the quality of the synthesized solutions is provided, depending on the number of evolutionary iterations used in implementing the genetic algorithm when static fitness functions are used.

Keywords: Load lifting mechanism, drive structure synthesis, genetic algorithm, artificial intelligence models.

Date of manuscript reception: 29.09.2025
Date of acceptance for publication: 04.12.2025
Date of publication: 25.12.2025

Author's information:

Kirill A. Goncharov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Land Transport and Technological Means, Russian University of Transport, e-mail: goncharov_bgu@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5895-1162

1. Введение

Процессы компоновки механизмов и их систем приводов являются в значительной степени трудоемкими и основанными на конструкторском опыте исполнителей. Многие системы автоматизированного проектирования, их модули и блоки позволяют решать задачи компоновки со значительными ограничениями, фактически предоставляя возможности только для визуального моделирования при манипулировании уже выбранными узлами и агрегатами. Ключевой сложностью при реализации подобных задач компоновки является проблема формализации ряда процедур, основанных на качественном анализе спектра принимаемых решений в условиях нечеткости или неоднозначности оценки соответствующих критериев эффективности [1 - 3].

При этом необходимо проводить четкие терминологические и классификационные границы при анализе объектов исследования, а именно разделять привод и исполнительные механизмы в каждой рассматриваемой механической системе, которые в отдельных случаях также включаются в структуру приводов [4]. И если отдельные приводы механизмов подъемно-транспортных машин имеют сходные принципы построения, то исполнительные механизмы, зачастую связывающие несколько приводов в единую систему, могут реализовывать абсолютно разные принципы распределения нагрузок на приводы и, соответственно, различаться алгоритмами и архитектурами систем управления. В качестве примера можно привести системы приводов многоприводных ленточных конвейеров, механизмы передвижения грузоподъемных машин на рельсовом и гусеничном ходу с раздельным приводом, грейферные лебедки двухканатных и четырехканатных грейферов. В случае многоприводных ленточных конвейеров картина распределения нагрузок на приводы зависит от конфигурации трассы конвейера и мест установки приводов [5]. Раздельные приводы грузоподъемных машин подвергаются переменной нагрузке в зависимости от координат положения груза и элементов механизмов на тележках и непосред-

ственно кранах, степени перекоса при движении, состояния реборд колес и рельс [6, 7]. Лебедки грейферных кранов работают взаимосвязано для реализации правильной последовательности работы грейфера. При этом сами приводы каждой из описанных выше систем характеризуются наличием одинаковых по назначению элементов: систем управления, двигателей, передач, соединительных устройств.

В настоящей статье под приводом в соответствии с [7, 8] будем понимать систему, состоящую из двигателя, аппаратуры управления и промежуточной передачи от двигателя к рабочему механизму, служащую для преобразования и передачи последнему какого-либо вида энергии, необходимой для его нормальной работы.

В работах [1; 5; 7] описаны различные подходы к компоновке отдельных приводов подъемно-транспортных машин. Указанные подходы базируются на алгоритмах принятия решений на основе накопленного проектного опыта, что может приводить к неэффективным конечным результатам проектных процедур. Возможным методом поиска наилучшего варианта компоновки, подходящим для реализации в подобной ситуации, является одно из концептуальных решений моделей искусственного интеллекта – генетический алгоритм [9].

Генетический алгоритм имитирует процесс естественного отбора, создавая и осуществляя эволюцию популяции особей (решений) в задачах оптимизации, имитируя, в том числе, генетические мутации [9]. После создания исходной популяции хромосом (наборов взаимосвязанных цепочек признаков искомых решений) вычисляется функция приспособленности. Значение функции приспособленности является количественной оценкой оптимальности решения и ранжирует его по отношению к другим решениям [9]. Далее хромосомы обмениваются своими частями (процедура кроссовера), создавая хромосом-потомков [9]. На следующем этапе выполняется мутация, в процессе которой случайным образом изменяется, как минимум, один ген (признак) в хромосоме [9]. Полученная популяция заменяет предыдущую, и



начинается новая итерация. Итерации генетического алгоритма завершаются при выполнении критерия завершения (как правило, заранее определенного количества итераций). В конечном итоге сохраняются наиболее приспособленные хромосомы [9].

2. Цель исследования

Целью настоящего исследования является применение и адаптация элементов генетического алгоритма к проектным процедурам синтеза структуры обобщенного привода механизма подъемно-транспортной машины. В качестве объекта исследования (рассматриваемого примера) выберем привод механизма подъема груза грузоподъемной машины (грузоподъемного крана, лифта, подъемника).

3. Особенности проведения исследования

С учетом приведенных выше сведений, согласно [9], генетический алгоритм состоит из двух принципиальных этапов:

- 1) создание исходной популяции решений (хромосом);
- 2) циклическая итерация модифицированных популяций решений по отношению к предыдущим (в том числе к исходной популяции) с постоянной оценкой функции приспособленности.

Одна циклическая итерация подразумевает следующие этапы:

- 1) создание из входной родительской популяции решений-потомков (хромосом-потомков);
- 2) мутация генов в полученной популяции хромосом-потомков;
- 3) оценка приспособленности каждой мутированной хромосомы-потомка, выявление наилучшего решения в соответствии с функцией приспособленности.

Применим описанный алгоритм к объекту исследования – приводу механизма подъема груза. Для создания популяций решений воспользуемся классификационной системой, предложенной в [7] (табл. 1).

В табл. 1 сознательно пропущен элемент – тормозная система, которая конструктивно может быть установлена в любом месте ки-

нематической схемы привода [7], что дестабилизирует последовательность выстраивания признаков в решении-хромосоме. Для уменьшения тормозного момента тормозную систему преимущественно располагают на быстроходном валу механизма (с учётом обязательного наличия жёсткой кинематической связи между исполнительным элементом лебедки и тормозной системой). С учетом данного обстоятельства тормозную систему можно классифицировать, как добавочный признак, который можно совместить с любым решением признака В.3. (табл. 1) после получения наилучшего решения в результате исполнения генетического алгоритма.

При реализации генетического алгоритма введем следующие условия, ограничения и допущения:

- 1) количество хромосом (решений) в одной популяции – 5;
- 2) каждая хромосома представляет собой комбинацию признаков (В.1., В.2., В.3., В.4., В.5., В.6.), в которой каждому признаку ставится в соответствие какое-либо одно возможное его решение согласно таблице 1 (пример вида хромосомы – (С.4., С.2., С.3., С.4., С.2., С.1.), где первый элемент С.4. соответствует признаку В.1., второй элемент С.2. соответствует признаку В.2. и т.д.);
- 3) на каждой итерации хромосомы-потомки формируются из хромосом-родителей посредством обмена своими половинами (соответственно любые три признака);
- 4) мутация хромосом на каждой итерации проводится случайным изменением варианта решения одного признака (гена) из шести;
- 5) функция приспособленности рассчитывается алгебраическим сложением оценок (табл. 1), соответствующих признакам в структуре рассматриваемой хромосомы; лучшим значением функции приспособленности является максимально возможная сумма баллов;
- 6) значение функции приспособленности принимается равным 0 в случае, если какие-либо решения признаков внутри хромосомы несовместимы (например, дроссельное регулирование и ручной привод).



Таблица 1

Варианты исполнения элементов привода механизма подъема груза

Признак	Обозначение	Описание	Оценка
B.1.	Система управления		
	C.1.	Дроссельное регулирование - гидропривод	4
	C.2.	Машинное регулирование - гидропривод	4
	C.3.	Ручное многоскоростное плавное регулирование – электропривод	7
	C.4.	Ручное многоскоростное ступенчатое регулирование – электропривод	8
	C.5.	Автоматическое многоскоростное плавное регулирование – электропривод	4
	C.6.	Автоматическое многоскоростное ступенчатое регулирование – электропривод	4
	C.7.	Без регулирования на естественных характеристиках	5
	C.8.	Автоматическое односкоростное плавное регулирование – электропривод	9
B.2.	Двигатель		
	C.1.	Гидромотор - гидропривод	5
	C.2.	Электродвигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором – электропривод	6
	C.3.	Электродвигатель переменного тока с фазным ротором – электропривод	6
	C.4.	Электродвигатель постоянного тока – электропривод	4
	C.5.	Ручной привод	2
B.3.	Соединение двигателя и передачи		
	C.1.	Компенсирующая муфта	9
	C.2.	Компенсирующие муфты в комплексе с трансмиссионным валом	7
	C.3.	Планетарная муфта	4
	C.4.	Планетарная муфта в комплексе с трансмиссионным валом и компенсирующей муфтой	3
	C.5.	Фрикционная муфта	1
	C.6.	Фрикционная муфта в комплексе с трансмиссионным валом и компенсирующей муфтой	1
	C.7.	Гидромуфта в комплексе с компенсирующей муфтой	3
	C.8.	Гидромуфта в комплексе с трансмиссионным валом и компенсирующей муфтой	2
	C.9.	Шпоночное или шлицевое соединение выходного вала двигателя и ведущей шестерни передачи	6
B.4.	Передача		
	C.1.	Цилиндрический редуктор	9
	C.2.	Червячный редуктор	3
	C.3.	Конический редуктор	4
	C.4.	Планетарный редуктор	5
	C.5.	Редуктор с совмещением передач разного типа	3
B.5.	Соединение передачи и исполнительного элемента		
	C.1.	Жесткая компенсирующая муфта	6
	C.2.	Совмещение опоры исполнительного элемента с валом редуктора	8
	C.3.	Тихоходная открытая зубчатая передача	6
B.6.	Исполнительный элемент		
	C.1.	Барабан	8
	C.2.	Канатоведущий шкив	4
	C.3.	Приводная звездочка	3

Принятый упрощенный вид функции приспособленности, основанный на сумме экспертных оценок вариантов решений признаков, обоснован необходимостью отработки на данной стадии общих особенностей реализации генетического алгоритма. Можно

предположить, что вид функции приспособленности естественным образом является отдельной темой исследований, подразумевая в идеальном случае уход от экспертных оценок с одной стороны [3], с параллельной реализацией их нелинейного вида – с другой.



В рассматриваемом примере очевидно (на основе анализа экспертных оценок, представленных в табл. 2), что наилучшим решением будет хромосома вида (С.8., С.2., С.1., С.1., С.2., С.1.) со значением функции приспособленности 49 (электропривод с автоматическим односкоростным плавным регулированием, электродвигателем переменного тока с короткозамкнутым ротором, компенсирующей муфтой, цилиндрическим редуктором, совмещением опоры исполнительного элемента с валом редуктора, барабаном). При исследовании особенностей реализации генетического алгоритма данное значение функции приспособленности примем в качестве эталонного в случае поиска необходимого числа итераций для его достижения.

Приведем пример построения исходной популяции. Исходные пять хромосом, полученные сопоставлением случайно выбранных единичных решений из каждого признака, и значения их функций приспособленности:

- 1) (С.1., С.1., С.3., С.2., С.1., С.1.) = 30;
- 2) (С.4., С.4., С.4., С.3., С.3.) = 29;
- 3) (С.2., С.2., С.2., С.2., С.2., С.2.) = 0;
- 4) (С.7., С.3., С.3., С.3., С.3., С.1.) = 33;
- 5) (С.8., С.5., С.6., С.5., С.1., С.1.) = 0.

Нулевые значения функций приспособленности хромосом 3 и 5 являются следствием несовместимости решений признаков систем управления и типов двигателей.

Создание хромосом-потомков реализуем посредством обмена первой и второй хромосомами решениями признаков В.4., В.5., В.6., а также обмена третьей и пятой хромосомами решениями признаков В.2., В.5., В.6. Тогда популяция хромосом-потомков будет выглядеть следующим образом:

- 1) (С.1., С.1., С.3., С.4., С.3., С.3.);
- 2) (С.4., С.4., С.4., С.2., С.1., С.1.);
- 3) (С.2., С.5., С.2., С.2., С.1., С.1.);
- 4) (С.7., С.3., С.3., С.3., С.3., С.1.);
- 5) (С.8., С.2., С.6., С.5., С.2., С.2.).

На данном этапе до проведения мутаций оценка функции приспособленности хромосом не проводится. В соответствии с установленной последовательностью реализации генетического алгоритма внесем в популяцию хромосом-потомков по одной мутации одного случайно выбранного гена. Допус-

тим, что мутации подвергся шестой ген каждой хромосомы, кроме четвертой (имевшей лучшее значение функции приспособленности на предыдущем этапе). Тогда популяция хромосом-потомков с мутировавшим геном и соответствующими значениями функций приспособленности будет выглядеть следующим образом:

- 1) (С.1., С.1., С.3., С.4., С.3., С.1.) = 32;
- 2) (С.4., С.4., С.4., С.2., С.1., С.3.) = 27;
- 3) (С.2., С.5., С.2., С.2., С.1., С.3.) = 0;
- 4) (С.7., С.3., С.3., С.3., С.3., С.1.) = 33;
- 5) (С.8., С.2., С.6., С.5., С.2., С.1.) = 35.

Лучшее значение функции приспособленности после первой итерации – 35, соответствует хромосоме 5.

Последующие итерации повторяются в соответствии с приведенным примером.

Отдельный интерес при осуществлении генетического алгоритма представляет собой необходимое количество итераций до достижения эталонного значения функции приспособленности. В идеальном случае – в такой проектной ситуации, в которой эталонного значения функции приспособленности не существует (сложный вид функции в комплексе с переменной интегральной оценкой, выставляемой не отдельным признакам, как в настоящем примере, а сочетаниям признаков), генетический алгоритм находится в условиях неопределенности, и единственным критерием его остановки может служить установленное на основе каких-либо исследований число его итераций. Поэтому, в первом приближении, в качестве метода для определения необходимого количества итераций генетического алгоритма может служить его исследование при работе с функцией приспособленности, имеющей однозначно установленное эталонное значение.

С этой целью реализуем описанный выше пример генетического алгоритма в среде Excel с использованием языка программирования VBA (Visual Basic). В процессе реализации будем менять число итераций от 5 до 1280 в геометрической прогрессии с коэффициентом прогрессии 2 (рис. 1). Количество реализаций генетического алгоритма для каждого числа итераций примем равным 10 (рис. 1).



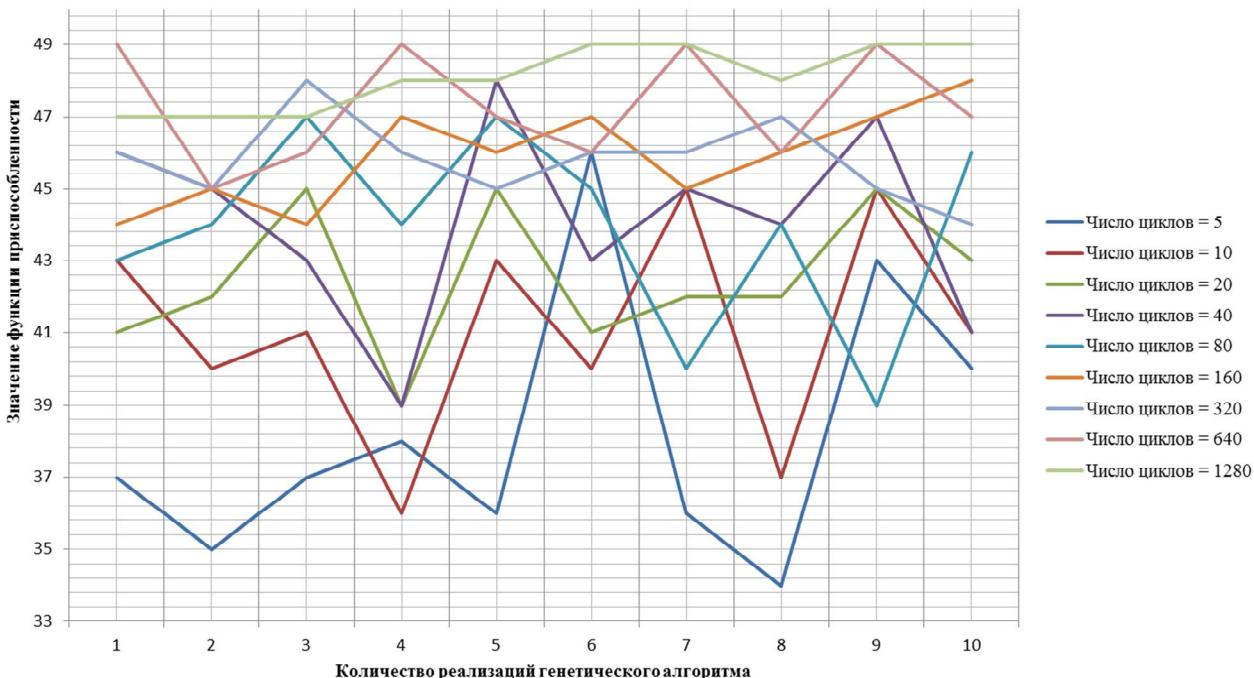


Рис. 1. Результаты реализации генетического алгоритма с различным числом итераций (по десять попыток на каждую итерацию)

4. Анализ результатов

Анализируя результаты реализации генетического алгоритма с различным числом итераций (рис. 1) можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что наилучший результат получен при реализации наибольшего числа итераций (в исследовании – 1280). При реализации 640 итераций максимальный результат аналогичен 1280-ти итерациям (в четырех из десяти попыток достигается эталонное значение функции приспособленности 49), однако среднее значение функции приспособленности на десять попыток составляет: для 640 циклов – 47,3, для 1280 циклов – 48,1. Этапонное значение функции приспособленности достигается только при 640 и 1280 итерациях.

2. При уменьшении количества итераций среднее значение функции приспособленности на десять попыток снижается при наличии возможных всплесков качественных решений.

3. Применение числа итераций от 5 до 80 демонстрирует среднее значение функции приспособленности менее 45 баллов (размах составляет 5,9 балла). Применение числа

итераций от 160 до 640 демонстрирует среднее значение функции приспособленности менее 47,3 баллов (размах составляет 1,4 балла).

На основе приведенных данных можно установить ориентировочные значения числа итераций генетического алгоритма в зависимости от ожидаемой точности результата:

- от 1 до 100 итераций – в среднем результат не стабилен, получение приемлемого качественного результата возможно (случайное решение), эталонное значение практически недостижимо;
- от 101 до 500 итераций – в среднем результат более стабилен, получение приемлемого качественного результата возможно (скорее закономерное, чем случайное решение), эталонное значение практически недостижимо (возможно единичное достижение);

- от 501 до 1000 итераций – в среднем результат стабилен, получение приемлемого качественного результата весьма вероятно (закономерное решение), эталонное значение практически достижимо с малой частотой;

- более 1000 итераций – в среднем результат стабилен, получение приемлемого качественного результата фактически гаран-

тировано, эталонное значение практически достижимо с приемлемой частотой.

Предложенная градация количества итераций требует изучения и дополнительного подтверждения при применении, как указано выше, сложных видов функций приспособленности в комплексе с переменной интегральной оценкой, выставляемой не отдельным признакам, а сочетаниям признаков. Однако уже на данном этапе качественное описание в рамках предложенной градации может служить отправной точкой при назначении количества итераций генетического алгоритма при его применении к решению вопросов компоновки не только приводов, но и подъемно-транспортных машин в целом.

5. Заключение

Предложенное в настоящей статье математическое решение процедуры формализации построения схем приводов механизма

подъема и поиска наилучшей из них на основе одного из концептуальных решений при построении моделей искусственного интеллекта – метода создания новых решений в виде генетического алгоритма является перспективным направлением исследований. Как показано выше, особое внимание следует уделить поиску наилучших вариантов описания функции приспособленности, особенно в условиях проектной неопределенности на начальных стадиях процесса проектирования.

Стоит также отметить, что корректная реализация генетического алгоритма может послужить базисом для создания специализированных систем автоматизированного проектирования следующего поколения – с нейросетевой архитектурой, предназначенных, в том числе, для поиска и принятия компоновочных решений в условиях неопределенности.

Список литературы

1. Гончаров К.А. Определение рационального варианта системы приводов ленточного конвейера ЛСТ-1600 // Вестник Брянского государственного технического университета, 2011. №4(32). С. 33 – 38.
2. Гончаров К.А. Обоснование методики выбора рациональных вариантов систем приводов ленточных конвейеров на основе метода анализа иерархий // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2016. №2. С. 66 – 70.
3. Гончаров К.А. Модификация метода анализа иерархий на основе устранения субъективности экспертных оценок на примере выбора рационального варианта системы приводов ленточного конвейера // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2024. №3. С. 170–178. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-170-178.
4. ГОСТ 34443 – 2018. Мобильные подъемники с рабочими платформами. Расчеты конструкции, требования безопасности, методы испытаний. Введ. 2019–07–01.

References

1. Goncharov K.A. Opredelenie ratsional'nogo varianta sistemy privodov lentochnogo konveyera LST-1600. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*, 2011, No.4(32), pp. 33 – 38. (In Russian)
2. Goncharov K.A. Substantiation of selection method of preferred alternative of belt conveyor drive systems on the basis of the analytic hierarchy process. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.2, pp. 66-70. (In Russian)
3. Goncharov K.A. Modification of the method of hierarchy analysis based on the elimination of the subjectivity of expert assessments using the example of choosing a rational option for a belt conveyor drive system. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2024, No.3, pp. 170-178. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-170-178 (In Russian)
4. GOST 34448–2018. Mobile elevating work platforms – Design, calculations, safety requirements and test methods. 2019–07–01, Standartinform, 2018. 80 p. (In Russian)



М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. 80 с.

5. Гончаров К.А. Тяговый расчет много-приводных ленточных конвейеров. Курск: ЗАО "Университетская книга", 2021. 271 с.

6. Денисов И.А., Гончаров К.А. Проектирование металлоконструкций грузовых тележек мостовых кранов на основе универсальных компоновочных схем. Курск: ЗАО "Университетская книга", 2022. 185 с.

7. Гончаров К.А., Толкачев Е.Н. Основы расчета и конструирования грузоподъемных машин. Курск: ЗАО "Университетская книга", 2019. 195 с.

8. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование» /М.П. Александров, Л.Н. Колобов, Н.А. Лобов и др. М.: Машиностроение, 1986. 400 с.

9. ГОСТ Р 71476–2024. Искусственный интеллект. Концепции и терминология искусственного интеллекта. Введ. 2025–01–01. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 54 с.

5. Goncharov K.A. *Tyagovyj raschet mnogoprivodnyh lentochnyh konveyerov* [Traction calculation of multi-drive belt conveyor]. Kursk, ZAO Universitetskaya kniga, 2021. 271 p. (In Russian)

6. Denisov I.A. *Proektirovaniye metallokonstrukciy gruzovykh telezhek mostovykh kranov na osnove universalnykh komponovochnykh skhem* [Design of metal structures for overhead crane trolleys based on universal layout schemes]. Kursk, ZAO Universitetskaya kniga, 2022. 185 p. (In Russian)

7. Goncharov K.A. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya gruzopodemnykh mashin* [Fundamentals of calculation and design of load lifting machines]. Kursk, ZAO Universitet-skaya kniga, 2019. 195 p. (In Russian)

8. Aleksandrov M.P., Kolobov L.N., Lobov N.A. *Gruzopodemnye mashiny* [Load lifting machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 400 p. (In Russian)

9. GOST R 71476–2024. Artificial intelligence – Artificial intelligence concepts and terminology. 2025–01–01, Russian Institute of Standardization, 2024. 54 p. (In Russian)