

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 621.0:621.867  
doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-31-40

## ВЫБОР СХЕМЫ ПРИВОДОВ КОНВЕЙЕРА С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Александр Алексеевич Реутов✉

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия  
bgtu2012@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1703-6654>, <http://orcid.org/0000-0003-1117-8536>

### Аннотация

Рассмотрена задача выбора схемы приводов (СП) конвейера с использованием нечетких частных критериев для неопределенных условий эксплуатации.

Целью работы является выбор СП конвейера с наилучшим показателем эффективности на основе нечетких значений частных критериев с учетом различных условий эксплуатации.

Методика исследований. При выборе СП использованы теории нечетких множеств, многокритериальной оценки альтернатив. Обобщенный критерий сформирован из нечетких экспертных оценок частных критериев с учетом различных условий эксплуатации. Для сравнения альтернатив на основе гипотез Лапласа, Вальда и Сэвиджа использованы дефаззированные значения обобщенного критерия.

Новизна работы. Разработана методика вычисления показателей эффективности для выбора наилучшего решения из множества альтернатив на основе гипотез Лапласа, Вальда и Сэвиджа по нечетким экспертным оценкам частных критериев

для неопределенных условий эксплуатации.

Результаты. Сформулирована задача выбора СП конвейера из множества допустимых альтернатив. Разработана методика вычисления показателей эффективности и выбора наилучшей СП из множества альтернатив. Рассмотрен пример выбора СП ленточного конвейера (ЛК) из 5 альтернатив для 12 возможных условий.

Выводы. Разработанная методика выбора СП позволяет системно оценивать значимость нечетких частных критериев, влияние неопределенных условий эксплуатации на выбор СП. Пример выбора СП ЛК показал, что согласно гипотезам Лапласа и Вальда наилучшей является СП с двумя приводными блоками в головной части ЛК, по гипотезе Сэвиджа – СП с двумя приводными блоками в головной части и одним приводным блоком в средней части ЛК. Три СП не вошли в число рекомендуемых ни по одному из показателей эффективности.

**Ключевые слова:** схема, привод, конвейер, критерий эффективности, оценки, условия, эксплуатация, сравнение.

Ссылка для цитирования:

Реутов А.А. Выбор схемы приводов конвейера с учетом неопределенности условий эксплуатации / А.А. Реутов // Транспортное машиностроение. – 2024. – №3. – С. 31-40. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-31-40.

Original article  
Open Access Article

## CHOOSING THE CONVEYOR DRIVE LAYOUT TAKING INTO ACCOUNT UNCERTAIN OPERATING CONDITIONS

Aleksandr Alekseevich Reutov✉

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia  
bgtu2012@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1703-6654>, <http://orcid.org/0000-0003-1117-8536>

### Abstract

The problem of choosing a conveyor drive layout using fuzzy partial criteria for uncertain operating conditions is considered.

The paper objective is to choose the conveyor drive layout with the best efficiency indicator based on

fuzzy values of particular criteria, taking into account various operating conditions.

Research methodology. When choosing conveyor drive layout fuzzy set theories and a multi-criteria assessment of alternatives are used. The gener-

alized criterion is formed from fuzzy expert assessments of particular criteria, taking into account various operating conditions. To compare the alternatives based on theories of Laplace, Wald and Savage, dephasing values of the generalized criterion are used.

The novelty of the work. A technique is developed for calculating efficiency indicators to select the best solution from a variety of alternatives based on theories of Laplace, Wald and Savage on fuzzy expert estimates of particular criteria for uncertain operating conditions.

Results. The problem of choosing a conveyor drive layout from a set of acceptable alternatives is formulated. A technique is developed for calculating efficiency indicators and choosing a conveyor drive layout from a variety of alternatives. An example of choosing a conveyor belt choosing a conveyor drive

*Reference for citing:*

*Reutov AA. Choosing the conveyor drive layout taking into account uncertain operating conditions. Transport Engineering. 2024;3:31-40. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-31-40.*

## Введение

Современные конвейеры с гибким тяговым органом (ленточные, ленточно-канатные, цепные) имеют разнообразные конструкции приводов. Так ленточные конвейеры (ЛК) имеют от одного до трех приводных блоков, установленных, как правило, в головной части конвейера. Протяженные конвейеры со сложной трассой дополнительно оборудуют промежуточными приводными блоками.

Приводным блоком называют отдельный узел, преобразующий электрическую или другую энергию в механическую и передающий силу тяги тяговому органу. Схема приводов (СП) определяет положение приводных блоков на трассе конвейера и их мощность.

Конвейеры малой длины и мощности имеют обычно один приводной блок, что обусловлено стремлением упростить конструкцию конвейера. Для протяженных конвейеров использование более прочного тягового органа связано с существенным увеличением капитальных затрат, поэтому устанавливают несколько приводных блоков.

При разработке технического задания (ТЗ) на проектирование конвейера многие требования и параметры не могут быть сформулированы однозначно [1], что приводит к статистической и экспертной (алеаторной и эпистемической) неопределен-

layout from 5 alternatives for 12 possible conditions is considered.

Conclusions. The developed technique of choosing a conveyor drive layout allows assess to systematically the importance of fuzzy particular criteria, the influence of uncertain operating conditions on the choice of a drive layout. An example of choosing a conveyor belt drive layout shows that according to Laplace and Wald theories, the best is a drive layout with two drive units in the head of the belt drive, according to Savage theory – a drive layout with two drive units in the head and one drive unit in the middle of the belt drive. Three drive layouts are not among the recommended ones for any of the efficiency indicators.

**Keywords:** layout, drive, conveyor, efficiency criterion, evaluation, conditions, operation, comparison.

ностям.

В [2] представлена методика оптимального проектирования технических объектов в условиях параметрической смешанной неопределенности. Входные и проектные недетерминированные параметры классифицируют по типу неопределенности и формируют модели их представления. Целевые функции и ограничения с неопределенными параметрами заменяют их детерминированными дубликатами.

В [3] рассмотрены вопросы моделирования совместной эпистемической и алеаторной неопределенности при использовании суррогатных моделей, построенных на свободных от шума обучающих точках без алеаторной неопределенности. Для количественной оценки последствий неопределенности при проектировании механических систем разработан метод, основанный на наиболее вероятных точках. Предложенный метод иллюстрирован примером проектирования вала. Результаты показали, что этот метод может эффективно оценивать ошибку модели и количественно определять неопределенность в процессе проектирования.

Выбор СП зависит от многих факторов и не может рассматриваться отдельно от выбора типоразмера тягового органа. В [4] предложен метод выбора оптималь-

ного привода для типового ЛК при неопределенных параметрах трассы. Неопределенность трассы приводит к неопределенности общего сопротивления движению и требуемого типоразмера конвейерной ленты (КЛ) для конкретного конвейера.

В [5] приведена методика выбора оптимальной СП ЛК с использованием нечетких значений экономических критериев. Экспертные оценки значений критериев

### Постановка задачи

Объектом исследования в настоящей статье является СП конвейера.

Целью работы является выбор СП конвейера с наилучшим показателем эффективности на основе нечетких значений частных критериев с учетом различных условий эксплуатации.

В качестве варьируемых параметров

### Описание частных критериев

В работах, посвященных исследованию эффективности приводов ЛК [6, 7, 8], предложены различные показатели (частные критерии): коэффициент использования прочности КЛ, стоимость единицы тягового усилия, эксплуатационные расходы, затраты на хранение запасных частей СП и др. В [8] показано, что оценивать СП ЛК необходимо совместно с КЛ.

Для оценки эффективности СП в качестве частных критериев рассмотрим затраты и расходы, связанные с эксплуатацией СП и тягового органа:

- $K_1$  – амортизационные отчисления от капитальных затрат на приобретение и монтаж приводных блоков.

- $K_2$  – амортизационные отчисления от капитальных затрат на приобретение и монтаж тягового органа.

- $K_3$  – эксплуатационные расходы на приводные блоки и тяговый орган.

- $K_4$  – расходы на хранение резерва запасных частей приводных блоков.

- $K_5$  – расходы на сверхурочные работы для компенсации простоев оборудования из-за отказов приводных блоков (сверхурочные работы необходимы для выполнения производственного плана предприятия).

ев представлены в виде нечетких чисел с трапециевидной функцией принадлежности. Оптимальную СП выбирают из множества апробированных альтернативных схем, соответствующих требованиям ТЗ, сравнивая  $\alpha$ -сечения обобщенного показателя эффективности. Нечеткие экспертные оценки носят обобщенный характер и не учитывают различие условий эксплуатации ЛК.

СП рассмотрим количество приводных блоков, их мощность и места установки, в качестве ограничений – требования ТЗ [1].

Множество альтернативных СП содержит известные и апробированные СП, предварительно отобранные в соответствии с ТЗ.

Критерии  $K_1 \dots K_5$  имеют единую единицу измерения (руб./год или \$/год) и приведены к одному периоду времени – календарному году.

Амортизационные отчисления, вычисляемые с использованием нормативной нормы, слабо учитывают фактический срок службы конкретного оборудования. Поэтому амортизационные отчисления  $K_1$  рассчитаем для срока эксплуатации приводных блоков до капитального ремонта, а  $K_2$  – для срока службы тягового органа до полной замены.

Обобщенный критерий объединяет частные критерии, характеризующие СП с разных сторон. Если частные критерии имеют схожий смысл (например, единовременные убытки, годовые расходы и т.п.) и представлены одной единицей измерения, то вычисление обобщенного критерия возможно без весовых коэффициентов. Поэтому оценку  $i$ -й альтернативы выразим обобщенным критерием  $Q_i$  в виде суммы значений частных критериев

$$Q_i = \sum_j K_{ij}, \quad (1)$$

где  $K_{ij}$  – значение  $j$ -го критерия для  $i$ -й альтернативы.

Сократить трудозатраты многокритерие-

риальной оценки альтернатив возможно, если определить значения критериев в натуральных единицах измерения только для одной, например, первой, альтернативы. Для оставшихся альтернатив следует использовать экспертные оценки относительных значений критериев

### Экспертные оценки значений частных критериев

Однозначное определение четких значений выбранных критериев в большинстве случаев невозможно из-за отсутствия исходных и справочных данных. Вероятностные оценки критериев можно получить по данным эксплуатации конвейеров аналогичных предприятий. Теоретические исследования использования нейросетей для количественной оценки неопределенностей различной природы представлены во многих работах [9].

Главной сложностью учета неопределенностей при проектировании СП конвейеров является отсутствие задокументированной или зафиксированной другим образом информации о экономических и технических показателях эксплуатации конвейеров в различных условиях. Поэтому для определения относительных и абсолютных значений критериев необходимо использовать согласованные знания экспертов.

В частности, необходимо согласовать граничные значения критериев и тестировать экспертов на способность предоставлять корректные значения критериев. Для обеспечения согласованности экспертных оценок, учета уровня компетентности экспертов, следует использовать процедуры взаимодействия экспертов [10]. В качестве тестовых заданий могут использоваться известные технические и эксплуатационные показатели конвейеров с разными СП.

В [11] с использованием теории до-

### Описание условий эксплуатации

Неопределенность условий эксплуатации конвейеров обусловлена недостатком и ненадежностью информации, необходимой для проектирования, поведением конкурентов, законодателей, изменением

$$\zeta_{ij} = K_{ij} / K_{1j}.$$

Переход от относительных значений критериев  $\zeta_{ij}$  к абсолютным значениям  $K_{ij}$  частных критериев осуществляют по формуле

$$K_{ij} = \zeta_{ij} K_{1j}.$$

казательств рассмотрена задача идентификации неопределенных параметров системы с неточной информацией. Сначала неопределенные параметры идентифицируют приближенно элементами интервального типа. Затем на основе неточных экспериментальных измерений интервалы постепенно калибруют к истинным значениям.

В общем случае эксперты могут давать нечеткие оценки значений критериев с использованием теории нечетких множеств. Числовые значения критериев  $K_{ij}$  или  $\zeta_{ij}$  представим нечеткими числами, характеризуемыми степенью принадлежности нечеткому множеству.

Степень принадлежности  $\mu \in [0, 1]$  отражает степень уверенности экспертов в правильности конкретного значения нечеткого числа. Например,  $\mu = 1$  означает согласованное достоверное значение критерия,  $\mu < 1$  – возможное значение. Если в оценке значения критерия участвует один эксперт, он непосредственно задает нечеткое число или вычисляет степень принадлежности через матрицу парных сравнений. При совместной работе нескольких экспертов степень принадлежности каждого значения критерия нечеткому множеству определяют как усредненное мнение экспертов. Для арифметических операций с нечеткими числами применим  $\alpha$ -уровневый принцип обобщения [12].

экономических условий.

Рассмотрим следующие усредненные за период эксплуатации конвейера условия:

– загруженность оборудования ( $y_{11}$  –

плановая;  $y_{12}$  – снижена на 10...30 %);

– качество и цена оборудования, запасных частей ( $y_{21}$  – высокая;  $y_{22}$  – средняя;  $y_{23}$  – низкая) зависят от выбора производителя;

– квалификация и укомплектованность персонала ( $y_{31}$  – достаточная;  $y_{32}$  – недостаточная).

Перечисленные вариации условий эксплуатации являются независимыми и производят 12 возможных сочетаний, для каждого из которых необходимы экспертные оценки значений критериев. При этом общим мнением экспертов является то, что снижение загруженности конвейера уменьшает эксплуатационные расходы ( $K_3$ ), но увеличивает годовые убытки от снижения объема перевезенного груза ( $K_5$ ).

### Выбор СП с учетом условий эксплуатации

Если выделены  $m$  условий эксплуатации, зафиксированные на момент выбора СП или прогнозируемые в будущем, то изменение частных критериев для разных условий эксплуатации определим как коэффициенты пропорциональности  $\gamma_{jk}$  ( $j = 1...5$ ,  $k = 1...m$ ) одинаковые для всех альтернатив. Коэффициенты  $\gamma_{jk}$  представим также нечеткими числами.

Обобщенный критерий  $i$ -й альтернативы при  $k$ -х условиях эксплуатации  $Q_{ik}$  вычислим как нечеткую сумму произведений нечетких значений  $K_{ij}$  и  $\gamma_{jk}$

$$Q_{ik} = \sum_j \gamma_{jk} K_{ij}. \quad (2)$$

Минимальное и максимальное  $\min Q_{ik\alpha}$  и  $\max Q_{ik\alpha}$  значения  $\alpha$ -сечений нечетких обобщенных критериев  $Q_{ik}$  позволяют сравнить альтернативные СП с использованием разных гипотез [13]. Уровень  $\alpha$  устанавливает минимальное значение функции принадлежности нечетких  $Q_{ik}$ , учитываемое при сравнении альтернатив. Так гипотеза Вальда основана на ожидании самого худшего из множества условий эксплуатации. Тогда оценкой  $i$ -й альтернативы служит четкое число - показатель эффективности  $W_i$

Высокое качество и повышенная цена оборудования, запасных частей, например, при выборе зарубежного производителя приводят к увеличению амортизационных отчислений ( $K_1$ ,  $K_2$ ) и расходов на запасные части ( $K_4$ ), но эксплуатационные расходы ( $K_3$ ) не изменяет. Низкое качество и цена оборудования, запасных частей приводят к уменьшению амортизационных отчислений  $K_1$ ,  $K_2$  и расходов  $K_4$ , но увеличивает расходы  $K_3$ .

Недостаточная квалификация и укомплектованность персонала, обслуживающего конвейер, увеличивает эксплуатационные расходы ( $K_3$ ) и расходы на сверхурочные работы для компенсации простоев ( $K_5$ ).

$$W_i = \max_k (\max Q_{ik\alpha}).$$

Наилучшей будет альтернатива минимизирующая показатель эффективности  $W_i$ .

Согласно гипотезе Сэвиджа оценкой  $i$ -й альтернативы для условий  $k$  является четкое число  $r_{ik}$

$$r_{ik} = \max Q_{ik\alpha} - \min_k (\max Q_{ik\alpha}).$$

Число  $r_{ik}$  является мерой потерь из-за незнания истинных условий эксплуатации.

Показателем эффективности  $i$ -й альтернативы для всех рассматриваемых условий является четкое число  $S_i$

$$S_i = \max_k r_{ik}.$$

Наилучшей будет альтернатива, минимизирующая показатель эффективности  $S_i$ .

Гипотеза Лапласа предполагает одинаковые вероятности осуществления рассматриваемых условий эксплуатации, и оценкой  $i$ -й альтернативы служит показатель эффективности (четкое среднее)

$$L_i = \frac{1}{2m} \sum_{k=1}^m (\min Q_{ik\alpha} + \max Q_{ik\alpha}).$$

Наилучшей будет альтернатива с минимальным значением  $L_i$ .

### Методика вычисления показателей эффективности СП

Методика включает следующие действия:

– формирование комплекса частных критериев для оценки эффективности СП.

– формирование множества альтернативных СП, отобранных в соответствии с ТЗ.

– формирование набора возможных условий эксплуатации конвейера.

– получение экспертных оценок частных критериев и коэффициентов условий эксплуатации.

### Пример выбора СП ЛК

Рассмотрим в качестве примера выбор СП для ЛК угольной шахты производительностью 2400 т/ч [14]. Длина конвейера – 4583 м, высота подъема груза – 591 м,

Рассмотрим пять альтернативных СП, соответствующих требованиям ТЗ:

•  $A_1$  – один приводной блок в головной части ЛК;

•  $A_2$  – два приводных блока в головной части ЛК;

•  $A_3$  – три приводных блока в головной части ЛК;

•  $A_4$  – два приводных блока с прижимной лентой в головной части ЛК;

•  $A_5$  – два приводных блока в головной части ЛК и один приводной блок в средней части ЛК.

Все альтернативные СП включают унифицированные приводные блоки. Каждый приводной блок содержит приводной барабан, редуктор, электродвигатель, тормоз, соединительные муфты. Для увеличения силы тяги СП с двумя приводными барабанами в схеме  $A_4$  используют прижимную ленту, прижимающую КЛ к поверхности второго приводного барабана [15].

Тяговый расчет ЛК показал, что для схемы  $A_1$  необходимы один приводной блок мощностью 6 МВт и КЛ прочностью 293 кН/м, для схемы  $A_2$  – два приводных блока мощностью 3 МВт каждый и КЛ прочностью 243 кН/м, для схемы  $A_3$  – три приводных блока мощностью 2 МВт каждый и КЛ прочностью 228 кН/м, для схемы  $A_4$  – два приводных блока мощностью 3 МВт каждый и КЛ прочностью 235 кН/м, для схемы  $A_5$  – три приводных блока мощностью 2 МВт каждый и КЛ прочностью 185 кН/м. При расчете требуемой мощности приводных блоков учтено, что сила тяги неравномерно распределяется между

– вычисление нечетких значений обобщенного критерия для всех альтернатив и условий эксплуатации.

– вычисление четких значений показателей эффективности СП (например, по гипотезам Лапласа, Вальда и Сэвиджа) и выбор наилучшей СП конвейера.

приводными барабанами.

Приводные блоки большой мощности изготавливают по индивидуальным заказам в течение нескольких недель. Чтобы избежать длительного простоя из-за поломки приводного блока, предприятия, эксплуатирующие ЛК, еще при изготовлении ЛК заказывают резервный приводной блок. Поэтому критерий  $K_1$  для схемы  $A_1$  оценим для двух приводных блоков, для схем  $A_2$  и  $A_4$  – для трех приводных блоков, для схем  $A_3$  и  $A_5$  – для четырех приводных блоков. Значения частных критериев  $K_{ij}$  и коэффициентов пропорциональности  $\gamma_{jk}$  представим нечеткими числами с трапециевидной функцией принадлежности. В табл. 1 приведены граничные значения критериев  $K_{ij}$  и  $\zeta_{ij}$  при  $\mu = 1$ , полученные на основе нечетких оценок экспертов при плановой загруженности оборудования ( $y_{11}$ ), среднем качестве и цене оборудования ( $y_{22}$ ), достаточной квалификации и укомплектованности персонала ( $y_{31}$ ).

Для схемы  $A_1$  приведены граничные значения ядер критериев  $K_{ij}$ . Для схем  $A_2 \dots A_5$  приведены граничные значения ядер критериев  $\zeta_{ij}$ .

В табл. 2 приведены граничные значения коэффициентов пропорциональности  $\gamma_{jk}$  при  $\mu = 1$  для 12 сочетаний рассмотренных условий эксплуатации (одинаковые для всех альтернатив).

Анализ табл. 2 позволяет системно оценить влияние условий эксплуатации на частные критерии. Так для амортизационных отчислений от капитальных затрат на СП и КЛ ( $j = 1, 2$ ) сильно влияние цены оборудования ( $y_{21}$ ). От квалификации и укомплектованности персонала ( $y_{32}$ ) сильно зависят расходы на эксплуатацию СП и КЛ ( $j = 3$ ), расходы на сверхурочные работы для компенсации простоев оборудования ( $j = 5$ ).

Таблица 1

Граничные значения критериев  $K_{ij}$  и  $\zeta_{ij}$  при  $\mu = 1$ 

Table 1

Boundary values of criteria  $K_{ij}$  and  $\zeta_{ij}$  at  $\mu = 1$ 

Схема	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
A <sub>1</sub>	220; 260 (тыс.\$)	1027; 1149 (тыс.\$)	116; 156 (тыс.\$)	23,7; 30,4 (тыс.\$)	240; 310 (тыс.\$)
A <sub>2</sub>	1,2; 1,3	0,75; 0,85	1,4; 1,6	0,45; 0,55	0,80; 0,88
A <sub>3</sub>	1,3; 1,4	0,72; 0,84	1,6; 1,7	0,28; 0,38	0,75; 0,93
A <sub>4</sub>	1,25; 1,35	0,73; 0,82	1,5; 1,7	0,55; 0,65	0,81; 0,93
A <sub>5</sub>	1,5; 1,8	0,6; 0,7	2,0; 2,3	0,28; 0,38	0,82; 0,93

Таблица 2

Граничные значения коэффициентов пропорциональности  $\gamma_{jk}$  при  $\mu = 1$ 

Table 2

Boundary values of proportionality coefficients  $\gamma_{jk}$  at  $\mu = 1$ 

$k$	Условия	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
1	$y_{11}, y_{21}, y_{31}$	1,2; 1,3	1,2; 1,3	1	1,1; 1,2	1
2	$y_{11}, y_{22}, y_{31}$	1	1	1	1	1
3	$y_{11}, y_{23}, y_{31}$	0,83; 0,87	0,83; 0,86	1,2; 1,35	1	1
4	$y_{11}, y_{21}, y_{32}$	1,2; 1,35	1,2; 1,35	1,4; 1,5	1,1; 1,2	1,05; 1,1
5	$y_{11}, y_{22}, y_{32}$	1	1	1,4; 1,5	1	1,05; 1,1
6	$y_{11}, y_{23}, y_{32}$	0,83; 0,87	0,83; 0,86	1,68; 1,75	1	1,05; 1,15
7	$y_{12}, y_{21}, y_{31}$	1,2; 1,3	1,2; 1,3	0,91; 0,95	1,1; 1,3	1,3; 1,5
8	$y_{12}, y_{22}, y_{31}$	1	1	0,91; 0,95	1	1,3; 1,4
9	$y_{12}, y_{23}, y_{31}$	0,83; 0,87	0,83; 0,85	1,092; 1,15	1	1,3; 1,4
10	$y_{12}, y_{21}, y_{32}$	1,2; 1,3	1,2; 1,3	1,274; 1,35	1,1; 1,2	1,365; 1,5
11	$y_{12}, y_{22}, y_{32}$	1	1	1,274; 1,35	1	1,365; 1,5
12	$y_{12}, y_{23}, y_{32}$	0,83; 0,87	0,83; 0,85	1,529; 1,65	1	1,365; 1,5

Сравним 5 альтернативных СП с использованием гипотез Лапласа, Вальда и Сэвиджа. Без учета вариации условий эксплуатации альтернативные СП можно оценить по минимальному и максимальному значениям ядер  $Q_{i2}$  ( $\min Q_{i2}$  и  $\max Q_{i2}$ ), для которых  $\gamma_{j2} = 1$  ( $j = 1 \dots 5$ ). Гипотеза Лапласа усредняет влияние условий эксплуатации. Гипотеза Вальда является пессими-

стической, поскольку предполагает самое худшее из условий эксплуатации. Гипотеза Сэвиджа минимизирует максимальные расходы из-за неблагоприятных условий эксплуатации.

Результаты сравнения альтернативных СП с использованием гипотез Лапласа, Вальда и Сэвиджа приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения  $\min Q_{i2}$ ,  $\max Q_{i2}$ ,  $L_i$ ,  $W_i$  и  $S_i$  для альтернативных СП

Table 3

Values of  $\min Q_{i2}$ ,  $\max Q_{i2}$ ,  $L_i$ ,  $W_i$  and  $S_i$  for alternative DS

Схема	$\min Q_{i2}$	$\max Q_{i2}$	$L_i$	$W_i$	$S_i$
A <sub>1</sub>	1626,7	1905,4	1917,4	2543,8	778,4
A <sub>2</sub>	1398,7	1853,8	1782,5	2475,3	714,8
A <sub>3</sub>	1409,6	1894,2	1815,5	2532,2	727,7
A <sub>4</sub>	1399,2	1868,8	1795,7	2498,3	714,6
A <sub>5</sub>	1381,4	1931,0	1838,0	2586,8	<b>703,7</b>

При вычислении  $L_i$  использовались средние величины ядер  $Q_{ik}$ , при вычислении  $W_i$  и  $r_{ik}$  – максимальные значения ядер  $Q_{ik}$ .

В табл. 3 жирным шрифтом выделены минимальные значения приведенных величин. Согласно гипотезам Лапласа и Вальда наилучшей является СП A<sub>2</sub> (два

приводных блока в головной части ЛК), по гипотезе Сэвиджа – СП А<sub>5</sub> (два приводных блока в головной части ЛК и один приводной блок в средней части ЛК). Минимальные значения  $maxQ_{i2}$  и  $minQ_{i2}$  также указывают на СП А<sub>2</sub> и А<sub>5</sub>. СП А<sub>1</sub>, А<sub>3</sub> и А<sub>4</sub> не вошли в число рекомендуемых ни по одному из показателей табл. 3. СП А<sub>1</sub> имеет наихудшие значения показателей  $minQ_{i2}$ ,  $L_i$  и  $S_{ik}$ .

Альтернативы А<sub>2</sub> и А<sub>5</sub> являются Парето-доминирующими по показателям табл. 3. СП А<sub>4</sub> оказалась на втором месте после СП А<sub>2</sub> и А<sub>3</sub>.

Без учета условий эксплуатации ( $\gamma_{jk} = 1$ ) разница между наилучшей и наихудшей СП по значениям ядер  $minQ_{i2}$  и  $maxQ_{i2}$  составляет 17,8 % и 4,2 %. С учетом вариации условий эксплуатации разница между наилучшей и наихудшей СП по значениям  $L_i$ ,  $W_i$  и  $S_i$  составляет 7,6 %, 4,5 %, 10,6 % соответственно.

При использовании обобщенного критерия (2) наиболее значимыми являются частные критерии и коэффициенты пропорциональности с большими величинами максимальных значений ядер  $maxK_{ij}$

## Заключение

Рассмотрена задача выбора СП конвейера из множества допустимых альтернатив с использованием нечетких частных критериев для неопределенных условий эксплуатации.

Разработана методика вычисления показателей эффективности для выбора наилучшей СП из множества альтернатив на основе гипотез Лапласа, Вальда и Сэвиджа. Для сравнения альтернативных СП использованы дефаззированные значения обобщенного критерия, сформированного из нечетких экспертных оценок частных критериев и различных условий эксплуатации.

Рассмотрен пример выбора СП ЛК из 5 альтернатив для 12 возможных условий. Обобщенный критерий СП ЛК представлен нечеткой суммой произведений нечетких значений частных экономических критериев  $K_{ij}$  и коэффициентов условий эксплуатации  $\gamma_{jk}$ .

Пример выбора СП ЛК показал, что

и  $max\gamma_{jk}$ . Для данных табл. 1 максимальные значения ядер  $maxK_{ij}$  соответствуют частным критериям  $K_{51}$  и  $K_{12}$  (амортизационные отчисления от капитальных затрат на приводные блоки и КЛ),  $K_{53}$  (расходы на эксплуатацию СП и КЛ),  $K_{15}$  (расходы на сверхурочные работы для компенсации простоев оборудования).

Для данных табл. 2 максимальные значения ядер  $max\gamma_{jk}$  соответствуют условиям  $k = 4$  ( $j = 1, 2$ );  $k = 6, 12$  ( $j = 3$ );  $k = 7$  ( $j = 4$ );  $k = 7, 10 \dots 12$  ( $j = 5$ ). Так условия  $k = 4$  – это сочетание плановой загрузки оборудования ( $y_{11}$ ) с высоким качеством и ценой оборудования, запасных частей ( $y_{21}$ ) при недостаточной квалификации и укомплектованности персонала ( $y_{32}$ ). Условия  $k = 6$  отличаются от условий условия  $k = 4$  низким качеством оборудования и запасных частей ( $y_{23}$ ). Условия  $k = 7$  – это сочетание сниженной на 10...30 % по сравнению с плановой загрузкой оборудования ( $y_{12}$ ), высокого качества и цены оборудования и запасных частей ( $y_{21}$ ) при достаточной квалификации и укомплектованности персонала ( $y_{31}$ ).

наиболее значимыми являются частные критерии  $K_{51}$  и  $K_{12}$  (амортизационные отчисления от капитальных затрат на приводные блоки и КЛ),  $K_{53}$  (расходы на эксплуатацию приводных блоков и КЛ),  $K_{15}$  (расходы на сверхурочные работы для компенсации простоев оборудования).

Согласно гипотезам Лапласа и Вальда наилучшей является СП с двумя приводными блоками в головной части ЛК, по гипотезе Сэвиджа – СП с двумя приводными блоками в головной части и одним приводным блоком в средней части ЛК. Две указанные СП являются Парето-доминирующими по показателям табл. 3. Три СП (А<sub>1</sub>, А<sub>3</sub> и А<sub>4</sub>) не вошли в число рекомендуемых ни по одному из показателей эффективности.

Учет вариации условий эксплуатации увеличивает разницу между наилучшей и наихудшей СП с 4,2 % до 7,6 %, 4,5 %, 10,6 % по гипотезам Лапласа, Вальда и Сэвиджа соответственно.

Разработанная методика выбора СП позволяет системно оценивать значимость нечетких частных критериев, влияние не-

определенных условий эксплуатации на выбор СП.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Реутов А.А. Нечеткое описание и выбор концепции проектирования // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 2. – С. 41-48.
2. Veresnikov G.S., Pankova L.A., Pronina V.A., Ogorodnicov O.V., Bashkirov I.G. Optimal design of technical objects under mixed parametric uncertainty // Proceedings of the 12th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE. 2019. DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911060
3. Accounting for Model Uncertainty in Machine Learning Assisted Mechanical Design Conference ASME 2023 International Design. November 2023. DOI:10.1115/DETC2023-116622.
4. Реутов А.А. Оптимизация приводов типовых ленточных конвейеров при неопределенности трассы // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Изд-во МГТУ. 2008. №7. С. 338-341.
5. Реутов А.А. Выбор схемы приводов ленточного конвейера с использованием нечетких значений критериев// Вестник Брянского государственного технического университета. -2018. -№ 2(63). С. 4-11. DOI: 10.12737/article\_5ac49dc2b336e4.04586141
6. Реутов А.А. Монтаж, эксплуатация и ремонт ленточных конвейеров. Брянск: Изд-во БГТУ, 2008. 104 с.
7. Реутов А.А. Особенности применения дополнительных лент в приводах ленточных конвейеров // Известия Уральского государственного горного университета. – 2014. – №1. – С.44-47.
8. Реутов А.А. Оптимизация конвейера с загрузоч-

9. Mohammadi R., Farsijani H. Optimization under Uncertainty: Machine Learning Approach // International journal of Innovation in Management Economics and Social Sciences. ISSN: 2783-2678. Int. J. Inn. Man. Eco. Soc. Sci. Vol. 3, No. 2. pp. 23-32.
10. Podvesovskii, A. A model of control of expert estimates consistency in distributed group expertise/ A. Podvesovskii, O. Michaleva, V. Averchenkov, A. Reutov, L. Potapov // 2<sup>nd</sup> Conference CIT&DS 2017, Communications in Computer and Information Science n. 754, – pp. 361-374.
11. Chong Wang Evidence-theory-based uncertain parameter identification method for mechanical systems with imprecise information //Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. July 2019. Iss. 351(2). –pp.281-296. DOI:10.1016/j.cma.2019.03.048.
12. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.
13. Розен В.В. Математические модели принятия решений в экономике. М.: Высш. шк., 2002. 288 с.
14. Келлер К., Фаттер Х., Виденрот Я. Проектирование и ввод в эксплуатацию протяженной конвейерной установки для соединительной выработки 4010 // Глюкауф. 2006. № 1(2). С. 17-29.
15. Привод ленточного конвейера: пат. РФ на изобр. RU 2544461 С1// Изобретения. Полезные модели.– Оpubл. 20.03.15, Бюл. № 8.

## REFERENCES

1. Reutov AA. Fuzzy description and choice of design concept. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2017;2;41-48.
2. Veresnikov GS, Pankova LA, Pronina VA, Ogorodnicov OV, Bashkirov IG. Optimal design of technical objects under mixed parametric uncertainty. Proceedings of the 12th International Conference, 2019: Management of Large-Scale System Development (MLSD). Moscow: IEEE; 2019. DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911060
3. Accounting for Model Uncertainty in Machine Learning Assisted Mechanical Design Conference ASME, 2023: International Design. November 2023. DOI:10.1115/DETC2023-116622.
4. Reutov AA. Optimization of drives of typical belt conveyors with route uncertainty. Mining Informational and Analytical Bulletin. Moscow: Publishing house of MGSU. 2008;7:338-341.

5. Reutov AA. Choice of belt conveyer drive circuit using fuzzy values of criteria. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2018;2(63):4-11. DOI: 10.12737/article\_5ac49dc2b336e4.04586141
6. Reutov AA. Installation, operation and repair of belt conveyors. Bryansk: Publishing house of BSTU, 2008. 104 p.
7. Reutov AA. Features of application of additional tapes in the drives of belt conveyors. News of the Ural State Mining University. 2014;1:44-47.
8. Reutov A.A. Optimization of a conveyor with a loading bunker under discontinuous speed variation. Minerals and Mining Engineering. 2018;6:109-117. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-109-117.
9. Mohammadi R, Farsijani H. Optimization under uncertainty: machine learning approach. International Journal of Innovation in Management Economics and Social Sciences. 3(2):23-32.

10. Podvesovskii A, Michaleva O, Averchenkov A, Reutov A, Potapov L. A model of control of expert estimates consistency in distributed group expertise. 2<sup>nd</sup> Conference CIT&DS, 2017: Communications in Computer and Information Science. p. 361-374.
11. Chong Wang. Evidence-theory-based uncertain parameter identification method for mechanical systems with imprecise information. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019;351(2):281-296.  
OI:10.1016/j.cma.2019.03.048.
12. Shtovba SD. Design of fuzzy systems by means of Matlab. Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom; 2007.
13. Rosen VV. Mathematical models of decision-making in economics. Moscow: Vysshaya Shkola Ekonomiki; 2002.
14. Keller K, Futter H, Wiedenroth Ya. Design and commissioning of an extended conveyor installation for connecting workings 4010. *Glukauf*. 2006;1(2):17-29.
15. RF Patent for invention No. 2544461. Belt conveyor drive: Useful models. 2015 March 20.

#### **Информация об авторе:**

**Реутов Александр Алексеевич** – доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета.

**Reutov Aleksandr Alekseevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor at Bryansk State Technical University.

**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 15.01.2024; одобрена после рецензирования 09.02.2024; принята к публикации 27.02.2024. Рецензент – Анцев В.Ю., доктор технических наук, профессор, Тульского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 15.01.2024; approved after review on 09.02.2024; accepted for publication on 27.02.2024. The reviewer is is Antsev V.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor of Tula State University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**