

УДК 621.91

Е.В. Мироненко, д-р техн. наук,
В.В. Калиниченко, канд. техн. наук, Краматорск, Украина

СТРАТЕГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

У статті представлені основні наукові підходи до створення оптимізаційних математичних моделей для визначення енергоєфективних технологічних параметрів токарної обробки деталей важкого машинобудування. Обґрунтовано використання питомої енергоємності різання у якості критерію оптимізації в математичних моделях процесів токарної обробки на важких верстатах.

Ключові слова: оптимізаційні математичні моделі, токарна обробка

В статье представлены основные научные подходы к созданию оптимизационных математических моделей для определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения. Обосновано использование удельной энергоёмкости резания в качестве критерия оптимизации в математических моделях процессов токарной обработки на тяжёлых станках.

Ключевые слова: оптимизационные математические модели, токарная обработка

In the article the main scientific approaches to the creation of optimization mathematical models for determination of energy efficient technological parameters of turning of heavy engineering parts is expounded. The use of specific power consumption of cutting as the optimization criteria of mathematical models of heavy turning is substantiated.

Keywords: optimization mathematical models, turning

Постановка проблеми

Важнейшей научно-практической проблемой отечественного машиностроения является повышение эффективности использования энергетических ресурсов в производстве. Машиностроительному комплексу Украины и других стран постсоветского пространства в силу исторических особенностей его развития присущ высокий уровень энергозатрат на единицу выпускаемой продукции, намного превышающий уровень энергозатрат на единицу продукции в ведущих промышленно развитых странах мира. Указанный фактор негативно влияет на конкурентоспособность продукции отечественных машиностроительных заводов, особенно с учетом неуклонного роста удельной доли стоимости энергозатрат в общей себестоимости продукции в связи с постоянным ростом цен на электроэнергию. Одним из стратегических направлений повышения конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения является повышение энергоэффективности процессов механической обработки деталей, особенно в высокоэнергоёмком тяжелом машиностроении.

Работа выполнена в рамках тематики НИР Донбасской государственной машиностроительной академии «Повышение энергоэффективности процессов механообработки на основе многокритериальной оптимизации параметров технологических систем тяжелого машиностроения».

Анализ исследований и публикаций по рассматриваемой проблеме

Важными резервами повышения энергоэффективности производства в машиностроении являются разработка и внедрение новых технологических процессов и методов обработки деталей, создание нового и модернизация используемого технологического оборудования, осуществляемые на основе известных принципов энергоэффективности и энергосбережения. Однако кардинальное обновление технологий и оборудования при коренном техническом перевооружении производства требует больших капитальных вложений, не обеспечивая их быстрой окупаемости. Значительная экономия энергоресурсов в производстве может быть достигнута и без его технического перевооружения, за счет использования энергоэффективных параметров технологических процессов, обеспечивающих минимальные энергозатраты на заданный объем выпуска продукции [1].

Эффективная механическая обработка деталей базируется на оптимизации технологических параметров процесса обработки по значимым для достижения поставленной цели критериям. Вопросы разработки математических моделей для определения оптимальных с точки зрения энергоэффективности параметров механической обработки рассматривались в работах В. К. Старкова [2], С. С. Силина и А. В. Баранова [3], В. С. Гусарева и Ю. В. Ярового [4], А. В. Карпова [5-7] и других ученых. Авторы указанных работ предлагают в качестве критериев оптимизации процессов механической обработки различные критерии, связанные с величиной энергозатрат на процесс резания.

Обзор нерешенных частей проблемы

В оптимизационных математических моделях процессов обработки на тяжелых станках энергетические критерии оптимальности применяются достаточно ограниченно [8]. Вместе с тем, высокая энергозатратность тяжелого машиностроения и постоянный рост стоимости электроэнергии обостряют проблему повышения энергоэффективности токарной обработки деталей тяжелого машиностроения, предполагая разработку и широкое внедрение математических моделей процесса обработки, основанных на использовании энергетических критериев оптимизации.

Цель статьи – сформулировать основные научные подходы к созданию оптимизационных математических моделей для определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения.

Основная часть

Значительную удельную долю деталей тяжелого машиностроения составляют детали-тела вращения (валки прокатных станов, роторы энергетических установок и др.) [9]. В структуре технологических процессов изготовления таких деталей преобладает токарная обработка, выполняемая на тяжелых токарных станках, причем около 70 % времени затрачивается на точение наружных цилиндрических поверхностей [8]. Обработка на тяжелых токарных станках отличается очень высоким уровнем энергозатрат, причинами чего являются:

- большие значения мощности электродвигателя привода главного движения (ПГД) станка, обуславливающие высокий уровень абсолютных затрат (потерь) энергии при заданном значении удельных затрат (потерь);
- большие припуски на обработку деталей, обуславливающие высокие силовые нагрузки в зоне резания и, следовательно, энергозатраты резания;
- большие потери электроэнергии при работе электродвигателя ПГД станка на холостом ходу во время смены режущей пластины (резцового блока) вследствие произошедшего отказа.

На основании анализа публикаций по теме исследования были систематизированы направления повышения энергоэффективности процессов механической обработки деталей на тяжелых токарных станках (рис. 1).

Снижение потерь энергии в электрической и механической части ПГД станка предполагает модернизацию привода, что не всегда может быть реализовано. Более перспективным направлением повышения энергоэффективности обработки деталей является снижение затрат энергии на протекание физических процессов в зоне резания, обеспечиваемое за счет оптимизации технологических параметров обработки.

Общая структура математической модели для определения оптимальных технологических параметров процессов механической обработки деталей предполагает решение оптимизационной задачи вида [2]:

$$Q = \text{extr} \{f(x, \omega) | x \in D\} \quad (1)$$

с системой ограничений вида:

$$g(x, \omega) \leq 0; \quad (2)$$

$$f(x) \leq 0; \quad (3)$$

$$a_i \leq x_i \leq b_i, \quad (4)$$

где $f(x, \omega)$ – целевая функция (критерий оптимизации);

x – управляемые (варьируемые) параметры обработки;

ω – постоянные входные параметры обработки;

D – область допустимых значений управляемых параметров x ;

$a_i = \text{const}$, $b_i = \text{const}$.

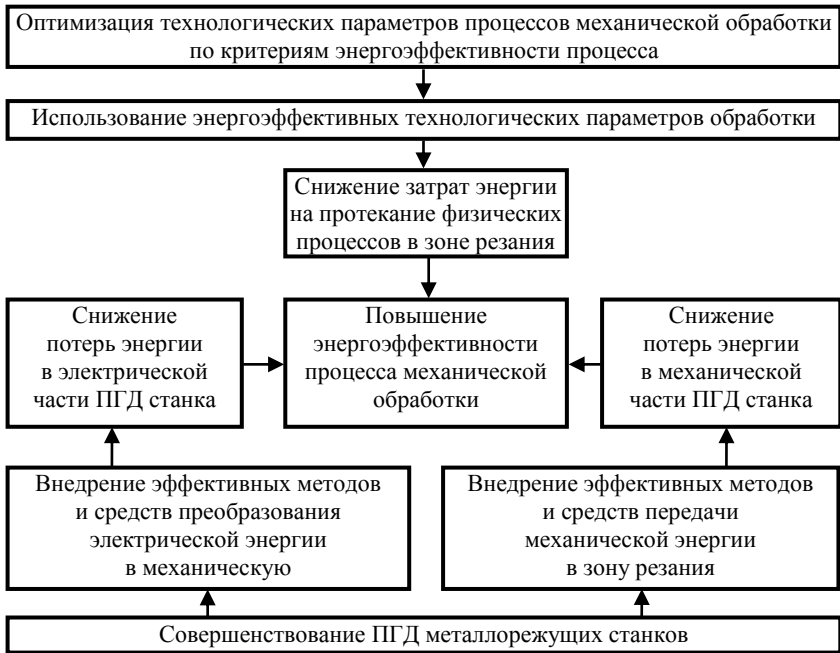


Рисунок 1 – Направления повышения энергоэффективности процессов механической обработки деталей на тяжелых токарных станках

Разработка структуры математической модели процесса механической обработки предполагает конкретизацию оптимизационной задачи (1) с ограничениями (2-4) путем последовательного выполнения этапов, представленных на рис. 2.

При решении задач оптимизации процессов механической обработки используются различные по своей сущности критерии оптимизации, в том числе обобщенные критерии, основанные на комплексной оценке различных аспектов процесса резания или комбинации различных оценок одного и того же критерия при решении минимаксных задач оптимизации [2].

Примеры некоторых критериев оптимизации, нашедших применение в математических моделях токарной обработки на тяжелых станках [8], приведены в табл. 1. Как правило, такие критерии оптимизации относятся к экономическим или технико-экономическим и отражают логику минимизации либо материальных затрат (минимум затрат A на обработку, минимум расхода R_c твердого сплава, минимум расхода R_u инструмента), либо затрат времени (минимум штучного времени t_{um} на обработку). Важной особенностью этих критериев является их соотношение к площади

обработанной поверхности и, следовательно, – к производительности обработки, ведь при оптимизации механообработки требуется не просто минимизировать материальные или временные затраты, а обеспечить максимальную производительность обработки при минимальных затратах.

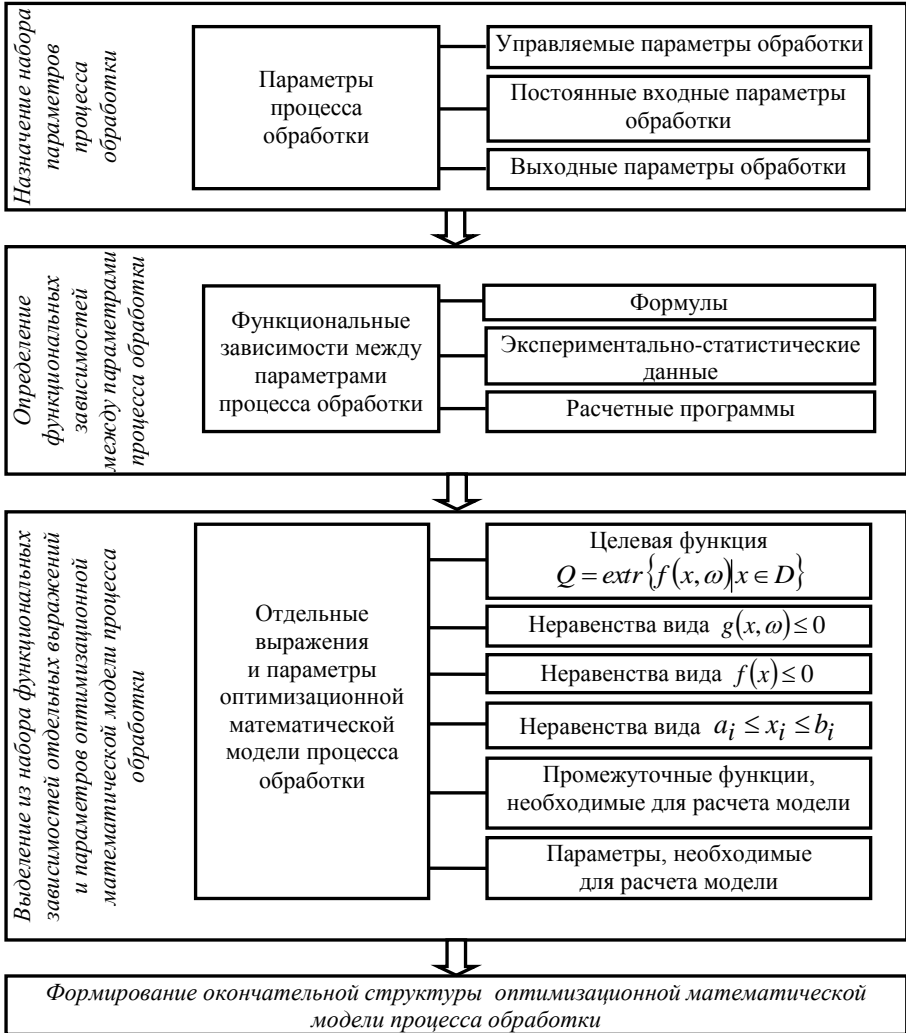


Рисунок 2 – Схема последовательности разработки оптимизационной математической модели процесса механической обработки

Энергетические критерии оптимизации использовались гораздо реже, поскольку до недавнего времени оптимизация с их помощью мало отражала вопросы экономики производства, но выявляла резервы производительности, предопределяемые физическими особенностями взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала заготовки [8].

Таблица 1 – Примеры распространенных критериев оптимизации процессов токарной обработки на тяжелых станках (по данным работы [8])

Наименование критерия оптимизации	Выражение для определения критерия оптимизации	Общий вид целевой функции
Затраты на обработку A , грн./м ²	$A = E \cdot t_{ум} + A_c \cdot R_c + A_u \cdot R_u + A_o \cdot F_o$	$A \rightarrow \min$
Штучное время на обработку $t_{ум}$, ч/м ²	$t_{ум} = \frac{t_o}{60} \cdot \left(1 + \frac{t_g}{T} \right)$	$t_{ум} \rightarrow \min$
Расход твердого сплава R_c , г/м ²	$R_c = \gamma \cdot l \cdot h \cdot b \cdot R_n = \gamma \cdot l \cdot h \cdot b \cdot \frac{t_o}{K \cdot T}$	$R_c \rightarrow \min$
Расход инструмента R_u , г/м ²	$R_u = \frac{R_n}{Z}$	$R_u \rightarrow \min$
Пояснения к таблице: E – стоимость станко-часа работы оборудования; A_c – стоимость твердого сплава; A_u – стоимость комплекта инструмента (без твердого сплава); A_o – стоимость оборотного фонда твердого сплава на рабочем месте; F_o – величина оборотного фонда твердого сплава на рабочем месте; t_o – основное время обработки (время резания); t_g – вспомогательное время обработки (время смены инструмента (режущей пластины)); T – период стойкости инструмента (режущей пластины); γ – плотность (удельная масса) твердого сплава; l , h , b – соответственно длина, толщина, ширина режущей пластины; R_n – расход твердосплавных режущих пластин; K – число периодов стойкости до разрушения режущей пластины; Z – число режущих пластин в комплекте		

В настоящее время очевидно, что оптимизационные модели высокоэнергоёмких процессов токарной обработки деталей на тяжелых станках обязательно должны включать критерии оптимизации, связанные с уровнем энергозатрат при резании. Анализ публикаций [1, 2, 4–7] позволил систематизировать информацию о некоторых таких критериях в табл. 3. Рассмотрим особенности использования энергетических критериев оптимизации в математических моделях процессов токарной обработки. Одним из наиболее распространенных является критерий минимума

эффективной мощности $N_{эф}$ резания [1], преимуществом которого является простота определения. Этот критерий отражает абсолютную величину энергозатрат на процесс резания, в то время как эффективность использования электроэнергии при механической обработке должна оцениваться показателями затрат энергии на удаление единицы объема срезаемого слоя или образование единицы площади обработанной поверхности. Кроме того, показатель $N_{эф}$ не может использоваться в качестве критерия оптимизации процессов токарной обработки с переменным значением эффективной мощности резания (подрезания торцов, прорезания канавок и т. д.).

Таблица 2 – Примеры критериев оптимизации процессов механической обработки, связанных с уровнем энергозатрат при резании

Наименование критерия оптимизации	Выражение для определения критерия оптимизации	Общий вид целевой функции
Эффективная мощность резания $N_{эф}$, кВт	$N_{эф} = \frac{P_z \cdot v}{60 \cdot 1020}$	$N_{эф} \rightarrow \min$
Удельная энергоёмкость резания e , Вт·мин/мм ³	$e = \frac{N_{эф}}{v \cdot S \cdot t}$	$e \rightarrow \min$
Безразмерный энергетический критерий q	$q = \frac{\sigma_e}{e}$	$q \rightarrow \max$
Энергетический КПД процесса резания K	$K = \frac{\Delta w \cdot V}{n_{ц} \cdot \int_0^{\tau_{ц}} N(\tau) d\tau}$	$K \rightarrow \max$
Критерий действия технологической системы D , Дж·мин ³	$D = N \cdot T^2$	$D \rightarrow \min$
Пояснения к таблице: P_z – тангенциальная составляющая силы резания; v – скорость резания; S – подача; t – глубина резания; σ_e – предел прочности обрабатываемого материала при разрыве; Δw – удельная энергоёмкость обрабатываемого материала; V – объем обрабатываемого материала, подвергнутого воздействию; $n_{ц}$ – число циклов изменения мощности резания $N(\tau)$ в единицу времени стружкообразования; $\tau_{ц}$ – время одного цикла изменения мощности резания; T – время обработки		

В работах [2, 5] в качестве критерия оптимизации высокопроизводительных процессов обработки со снятием значительных припусков рекомендуется применять удельную энергоемкость резания:

$$e = \frac{A_{рез}}{V} = \frac{N_{эф}}{P_{рез}} = \frac{N_{эф}}{v \cdot S \cdot t},$$

где $A_{рез}$ – работа резания;

V – объем срезаемого слоя материала, превращаемого в стружку;

$N_{эф}$ – эффективная мощность резания;

$P_{рез}$ – производительность резания (съем стружки в единицу времени);

v – скорость резания;

S – подача резца;

t – глубина резания.

Удельная энергоемкость резания адекватно отображает уровень энергозатрат в зоне резания, расходуемых на съем заданного объема материала срезаемого слоя заготовки.

Безразмерный энергетический критерий q и энергетический КПД процесса резания K , предложенные в работах [6, 7], позволяют оценить долю энергозатрат в зоне резания, расходуемых на выполнение «полезной» работы при стружко- и формообразовании и на протекание неизбежно сопровождающих их физических процессов, инициирующих изнашивание инструмента и деформацию поверхностного слоя обработанной детали («вредную» составляющую выполняемой работы резания). Энергетический КПД процесса резания K может применяться для оценки энергоэффективности механообработки с переменным значением $N_{эф}$.

Вместе с тем, при решении задачи минимизации расхода электроэнергии при обработке на тяжелых станках данная задача не является первоочередной, поэтому использование энергетических критериев q и K имеет смысл лишь для более полного изучения физических закономерностей процесса резания с целью выявления резервов повышения доли «полезной» составляющей и, соответственно, снижения доли «вредной» составляющей работы резания в энергетическом балансе зоны резания.

Критерий действия технологической системы D , предложенный в работе [4], с успехом может быть использован для сравнения энергоэффективности различных технологических процессов и методов обработки, в том числе принципиально разной физической природы. Вместе с тем, целесообразность его применения для оптимизации затрат

энергоресурсов при обработке деталей на тяжелых станках вызывает сомнения.

Анализ энергетических критериев оптимизации процессов механической обработки, представленных в табл. 2, позволил сделать вывод о предпочтительности использования в оптимизационных математических моделях токарной обработки на тяжелых станках критерия минимума удельной энергоемкости резания. В работе [2] отмечаются следующие достоинства данного критерия:

– удельная энергоемкость, характеризующая физико-механическое состояние зоны резания, служит физическим показателем эффективности съема материала и определяет условия работы режущего инструмента;

– удельная энергоемкость резания – универсальный критерий, величина которого зависит только от свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента, режима резания и не зависит от характера производства;

– целесообразность применения удельной энергоемкости бесспорна при оптимизации условий резания, когда условные экстремумы экономических критериев лежат на границе области допустимых значений оптимизируемых параметров.

В таком случае целевая функция оптимизации процесса токарной обработки на тяжелых станках при поиске наиболее энергоэффективных параметров съема припуска примет общий вид:

$$e = \min\{f(x, \omega) | x \in D\}.$$

На основании опыта оптимизации процессов обработки деталей на тяжелых токарных станках в качестве управляемых параметров x_i оптимизационной модели имеет смысл принять скорость резания v (либо частоту вращения шпинделя n для станков со ступенчатым регулированием ПГД) и подачу резца S . Глубину резания t , назначаемую технологом, равно как свойства обрабатываемого и инструментального материала, геометрические параметры инструмента, принимаем в качестве постоянных входных параметров ω_i оптимизируемого перехода обработки.

Логика известных закономерностей $N_{эф} = \frac{P_z \cdot v}{60 \cdot 1020}$

и $P_z = 10 \cdot C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \cdot S^{y_{P_z}} \cdot v^{n_{P_z}} \cdot K_{P_z}$ (P_z – тангенциальная составляющая силы резания; C_{P_z} – коэффициент; x_{P_z} , y_{P_z} , n_{P_z} – показатели степени, K_{P_z} – поправочный коэффициент на фактические условия резания) обуславливает степенной характер зависимости $e = f(S, v)$. Целевая функция

минимума удельной энергоёмкости резания, выраженная через управляемые параметры модели, может быть представлена как

$$e = f(S, v) = \frac{C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}-1} \cdot S^{y_{P_z}-1} \cdot v^{n_{P_z}} \cdot K_{P_z}}{6120} \rightarrow \min ,$$

где для заданного перехода обработки $C_{P_z} = const$, $K_{P_z} = const$,
 $t = const$.

Поиск экстремума целевой функции $e = f(S, v) \rightarrow \min$ выполняется в области D допустимых значений управляемых параметров (S, v) модели, задаваемой системой ограничений по лимитирующим характеристикам обработки. Общий вид ограничений модели оптимизации процесса продольного точения на тяжелых токарных станках представлен в табл. 3. В результате переноса в правую часть каждого из неравенств составляющих W , зависимых лишь от постоянных параметров обработки, получаем общий вид ограничений как зависимостей от управляемых параметров (S, v) модели.

Приведенные в табл. 3 ограничения в дальнейшем конкретизируются с помощью расчетно-теоретических формул и эмпирических зависимостей.

Учитывая степенной характер целевой функции и большинства ограничений, оптимальные технологические параметры токарной обработки деталей тяжелого машиностроения будут определяться с применением аппарата нелинейной оптимизации.

Удельная энергоёмкость резания может применяться как в качестве единственного критерия в однокритериальной оптимизации, так и совместно с другими критериями экономического и технико-экономического характера в моделях многокритериальной оптимизации.

При разработке моделей многокритериальной оптимизации для определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения формирование представительного набора критериев оптимизации должно базироваться на изложенных в работе [8] принципах:

1) принцип полноты (использование дополнительных критериев не меняет результаты, а отбрасывание хотя бы одного критерия приводит к изменению результатов);

2) принцип минимальности (набор критериев оптимизации должен содержать как можно меньшее число критериев);

3) принцип операциональности (каждый критерий должен иметь понятную формулировку, однозначный смысл, быть удобным для расчетов);

4) принцип измеримости (каждый критерий должен допускать возможность количественной оценки);

Таблица 3 – Общий вид ограничений модели оптимизации процесса продольного точения на тяжелых токарных станках

Лимитирующая характеристика	Общий вид ограничения	Общий вид ограничения как зависимости от управляемых параметров (S, v)
Мощность резания	$N_{эф} \leq N_{дв} \cdot \eta_{см}$	$S^y P_z \cdot v^z P_z^{+1} \leq W_M$
Режущая способность резца	$T \geq T_H$	$S^y v \cdot v \leq W_{p.c}$
Прочность державки резца	$P_z \leq [P_z]_{n.p}$	$S^y P_z \cdot v^z P_z \leq W_{n.p}$
Прочность режущей пластины	$P_z \leq [P_z]_{n.n}$	$S^y P_z \cdot v^z P_z \leq W_{n.n}$
Жесткость обрабатываемой детали	$P_y \leq [P_y]_{ж.д}$	$S^y P_y \cdot v^z P_y \leq W_{ж.д}$
Жесткость резца	$P_z \leq [P_z]_{ж.p}$	$S^y P_z \cdot v^z P_z \leq W_{ж.p}$
Шероховатость обработанной поверхности	$R_a \leq R_{amp}$	$S \leq W_{ш}$
Прочность механизма подачи станка	$P_x \leq P_{см}$	$S^y P_x \cdot v^z P_x \leq W_{нод}$
Производительность обработки	$\Pi \geq \Pi_{mp}$	$S \cdot v \geq W_n$
Время работы двигателя ПГД станка на холостом ходу	$T_{x.x} \leq T_{x.xmp}$	$S^y v \cdot v^{n_v} \leq W_{x.x}$
Кинематические характеристики станка	$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$ $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$	

Пояснения к таблице: 1. $N_{дв}$ и $\eta_{см}$ – мощность двигателя ПГД станка и КПД привода; T и T_H – период стойкости резца и его нормативное значение; $[P_z]_{n.p}$, $[P_z]_{n.n}$, $[P_z]_{ж.p}$ – значения P_z , допускаемые прочностью державки резца, прочностью режущей пластины, жесткостью резца; P_y и $[P_y]_{ж.д}$ – радиальная составляющая силы резания и ее значение, допускаемое жесткостью детали; P_x и $P_{см}$ – осевая составляющая силы резания и наибольшая сила, допускаемая прочностью механизма подачи станка; R_a и R_{amp} – фактическая и требуемая чертежом шероховатость обработанной поверхности; Π и Π_{mp} – фактическая и требуемая производительность обработки; $T_{x.x}$ и $T_{x.xmp}$ – фактическое и требуемое время работы двигателя ПГД станка на холостом ходу.

2 Составляющие W в ограничениях: W_M – в ограничении по мощности резания; $W_{p.c}$ – по режущей способности резца; $W_{n.p}$ – по прочностности державки резца; $W_{n.n}$ – по прочностности режущей пластины; $W_{ж.д}$ – по жесткости обрабатываемой детали; $W_{ж.p}$ – по жесткости резца; $W_{ш}$ – по шероховатости обработанной поверхности; $W_{нод}$ – по прочностности механизма подачи станка; W_n – по производительности обработки; $W_{x.x}$ – по времени работы двигателя ПГД станка на холостом ходу

5) принцип автономной информативности (каждый критерий должен содержать как можно больше информации, не исчерпанной информацией, содержащейся в других критериях и не являющейся аддитивной по отношению к последней);

6) принцип экономичности (набор критериев оптимизации должен обеспечивать минимальные затраты на реализацию модели).

Выводы

В статье представлены основные научные подходы к созданию математических моделей для определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения. На основании анализа особенностей применения известных энергетических критериев оптимизации механообработки обосновано использование удельной энергоемкости резания в качестве критерия оптимизации в математических моделях процессов токарной обработки деталей на тяжелых станках. Представлен общий вид ограничений модели.

Список использованных источников: 1. *Мироненко, Е. В.* Оптимизация режимов резания при обработке на тяжелых токарных станках с учетом энергозатрат / *Е. В. Мироненко, В. С. Гузенко, Л. В. Васильева, О. Е. Мироненко* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 40. – С. 62–70. 2. *Старков, В. К.* Физика и оптимизация резания материалов / *В. К. Старков*. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-94275-460-0. 3. *Силин С. С.* Оптимизация операций механической обработки по энергетическим критериям / *С. С. Силин, А. В. Баранов* // Станки и инструменты. – 1999. – № 1. – С. 16–17. 4. *Гусарев, В. С.* Экспериментальное исследование зависимости действия технологической системы от режимов формообразования / *В. С. Гусарев, Ю. В. Яровой* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. № 7 (104). – С. 12–16. 5. *Карпов, А. В.* Оптимизация процессов обработки резанием на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения материалов / *А. В. Карпов* // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 1. – С. 58–63. 6. *Карпов, А. В.* Об оценке энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием / *А. В. Карпов* // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 2. – С. 61–68. 7. *Карпов, А. В.* К вопросу снижения энергоемкости технологических процессов обработки резанием / *А. В. Карпов* // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. 8. *Мироненко, Е. В.* Научные основы создания систем агрегатно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01. / *Е. В. Мироненко*; Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск, 2003. – 417 с. 9. *Васильченко, Я. В.* Разработка технологических систем для обработки крупногабаритных деталей на базе адаптивных многоцелевых тяжелых станков / *Я. В. Васильченко, Т. А. Сукова, М. В. Шаповалов* // Вісник СевНТУ. Зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. Севастополь: СевНТУ. – 2013. – Вип. 139. – С. 28–32.

Bibliography (transliterated): 1. *Mironenko, Ye. V.* Optimizacija rezhimov rezanja pri obrabotke na tiazhelyh tokarnykh stankakh s uchetom energozatrat / *Ye. V. Mironenko, V. S. Guzenko, L. V. Vasiljeva, O. Ye. Mironenko* // Visnyk Nacional'nogo tehnicnogo universytetu «Harkivs'kyj politehnicnyj instytut». Zbirnyk naukovykh prac'. Tematychnyj vypusk: Tehnologiji v mashynobuduvanni. Harkiv: NTU «HPІ». – 2010. – № 40. – С. 62–70. 2. *Starkov, V. K.* Fizika i optimizacija rezanja materialov / *V. K. Starkov*. – М.: Mashinostrojenije, 2009. – 640 s. – ISBN 978-5-94275-460-0. 3. *Silin, S. S.* Optimizacija operacij mehanicheskoy obrabotki po energeticheskim

kriterijam / S. S. Silin, A. V. Baranov // Stanki i instrumenty. – 1999. – № 1. – S. 16–17.

4. Gusarev, V. S. Eksperimental'noje issledovanie zavisimosti dejstvija tehnologicheskoj sistemy ot rezhimov formoobrazovanija / V. S. Gusarev, Ju. V. Jarovoj // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. – 2013. – № 7 (104). – S. 12–16.

5. Karpov, A. V. Optimizacija processov obrabotki rezaniem na osnove energeticheskikh zakonomernostej deformacii i razrushenija materialov / A. V. Karpov // Mashinostrojenie i bezopasnost' zhynedejatel'nosti. – 2012. – № 1. – S. 58–63.

6. Karpov, A. V. Ob ocenke energeticheskoi effektivnosti tehnologicheskikh processov obrabotki rezaniem / A. V. Karpov // Mashinostrojenie i bezopasnost' zhynedejatel'nosti. – 2014. – № 2. – S. 61–68.

7. Karpov, A. V. K voprosu snizhenija energoemkosti tehnologicheskikh processov obrabotki rezaniem / A. V. Karpov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. – 2013. – № 2.

8. Mironenko, Ye. V. Nauchnye osnovy sozdaniya sistem agregatno-modulnykh instrumentov dla tiazhelykh tokarnykh stankov: dis. ...d-ra techn. nauk: 05.03.01. / Ye. V. Mironenko ; Donbasskaja gos. mashinostroitel'naja akademija. – Kramatorsk, 2003. – 417 s.

9. Vasilchenko, Ya. V. Razrabotka tehnologicheskikh sistem dla obrabotki krupnogabaritnykh detalej na baze adaptivnykh mnogocelevykh tiazhelykh stankov / Ya. V. Vasilchenko, T. A. Sukova, M. V. Shapovalov // Visnyk SevNTU. Zb. nauk. pr. Serija : Mashinopryladobuduvannia ta transport. Sevastopol' : SevNTU. – 2013. – Vyp. 139. – S. 28–32.