

***Е.В.МИРОНЕНКО**, д-р техн. наук, профессор ДГМА, Краматорск;  
**В.С.ГУЗЕНКО**, канд. техн. наук, доцент ДГМА, Краматорск;  
**Л.В.ВАСИЛЬЕВА**, ст.преподаватель ДГМА, Краматорск;  
**О.Е.МИРОНЕНКО**, нач. бюро инстр. отдела ОАО «НКМЗ».*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА ТЯЖЕЛЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С УЧЕТОМ ЭНЕРГОЗАТРАТ**

Results of research of influencing the modes of cutting on the expenditures of energy. Choice of the modes of cutting from point of minimization of expenditures.

У статті наведені результати дослідження впливу режимів різання токарної обробки на енерговитрати і їх вибір з точки зору мінімізації цих витрат.

Достижение экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдения требований к охране окружающей среды в настоящее время рассматривается как долгосрочная программа действий [1]. Использование перспективных принципиально новых технологий позволяет достичь существенного эффекта снижения энергоёмкости технологических процессов, но требует значительных капитальных вложений и не приводит к быстрой окупаемости. Анализ показывает, что значительное снижение удельного расхода электроэнергии наблюдается при создании энергосберегающих технологий путём установления такого уровня некоторых параметров технологического процесса, связанных с режимом электропотребления, которые обеспечивают минимум электроэнергии при сохранении объёма выпускаемой продукции.

Вопросы энергосбережения по-разному рассматриваются в современных исследованиях. В [2] приводятся причины существующей проблемы, заключающиеся в большой степени в наследственной базе машиностроения, а в [3] предлагается разработанный ряд программ и предложений по энергосбережению. Проблема увеличения удельного расхода энергии при переходе от черновой токарной обработки к чистовым операциям рассматривается в работе [4]. В качестве решения предлагается создание процессов резания инструментами, которые были бы альтернативой процессу шлифования. Проблемы потребления электроэнергии в машиностроительной отрасли анализируются в [5]. В этой монографии рассматривается вопрос диверсификации использования источников энергии в масштабах одного предприятия и производственной группы. Отдельно исследуется потребление энергии отдельным процессом в смысле как объема, так и потребляемой мощности с распределением по стадиям технологического процесса.

В указанных работах рассматриваются общие вопросы энергосбережения без анализа энергопотребления единичного

технологического процесса, в основном включающего в себя потребление оборудования, оснастки и инструмента.

Целью данной статьи является исследование влияния режимов токарной обработки на энергозатраты и их оптимальный выбор с точки зрения минимизации этих затрат.

Для оптимизации сложных технических систем необходимо решать задачи многокритериальной оптимизации, которые характеризуются такими особенностями, как: высокая размерность вектора альтернатив и сложная структура множества допустимых альтернатив; большое количество и нелинейность функций-ограничений; большая размерность критериальной вектор-функции и сложная топология критериев оптимальности, ее составляющих; большой объем вычислений. Все это требует использования специальных программных комплексов. В настоящее время выбор таких программ достаточно разнообразен.

Система принятия многокритериальных решений Web-HIPRE [6], основанная на методах Multiattribute Value Theory и Analytic Hierarchical Processes, является доступной для использования в глобальной сети. Система NIMBUS [7] учитывает в своей работе выбор лица, принимающего решения, а система Easy-Opt [8] представляет собой интерактивную программу, использующую метод скалярной свертки критериев оптимальности. Разработанная в МГТУ им. Н.Баумана система МКО Парето [9] ориентирована на использование как в последовательном, так и параллельном вариантах.

В данной работе использовалась интеллектуальная оптимизационная система «МКО-ТСЧ» [10], предназначенная для решения многокритериальных нелинейных оптимизационных задач вида

$$\begin{aligned} \min f(x), \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \\ a \leq x \leq b \end{aligned} \quad (1)$$

где  $f, g, h$  - непрерывные ( $f$  и  $g$  - выпуклые) вектор-функции,  $x \in R^n$ , а  $b$  ( $a < b$ ) – фиксированные вектора из  $R^n$ .

Метод многокритериальной оптимизации сводит задачу (1) к последовательности более простых задач нелинейного программирования с одной целевой функцией  $\psi$ :

$$\begin{aligned} \min \psi_p (f^0(x), f^1(x), \dots, f^m(x)), p = 1, 2, \dots \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \\ a \leq x \leq b \end{aligned} \quad (2)$$

В свою очередь, метод нелинейного программирования сводит задачу (2) к последовательности задач безусловной минимизации без функциональных ограничений:

$$\begin{aligned} \min M_k (f(x), g(x), h(x)), k = 1, 2, \dots \\ a \leq x \leq b \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, система «МКО-ТСЧ» является иерархической структурой и состоит из трех слоев:

- набора методов многокритериальной оптимизации;
- набора методов нелинейного программирования;
- набора методов безусловной минимизации.

Эта система позволяет работать с достаточно большим набором нелинейных функций с нелинейными ограничениями и была многократно проверена при расчетах оптимальных режимов работы процессов механообработки [11].

В работе исследовалось влияние режимов резания на энергозатраты в случае чернового наружного точения конструкционной стали резцами с пластиной твердого сплава на станке с  $D_c = 1000$  мм (задаваемые глубины резания  $t=4-8$  мм; диапазон подач  $s=0,75 - 1,3$  мм/об, диапазон скоростей резания  $v=50-150$  м/мин), а также процесс черновой обработки на тяжелых станках резцами оснащенными специальными твердосплавными пластинами с износостойким покрытием GC 4025.

Для реализации поставленных задач предлагаются следующие этапы:

- исследование технологических параметров, определяющих режим электропотребления и допускающих изменение в заданных пределах;
- построение математических оптимизационных моделей исследуемого объекта;
- нахождение оптимальных значений при ограничениях, накладываемых на технологические параметры.

Такой подход к указанной проблеме не требует значительных капиталовложений и его можно использовать как эффективный способ совершенствования технологии с точки зрения энергосбережения.

Выявить влияние параметров технологического процесса на электропотребление возможно с помощью построения системы критериев оптимальности. При этом в первую очередь выбирают наиболее существенные управляемые факторы, формирующие многокритериальную математическую модель. Она должна иметь реальный смысл, наиболее полно отражать некоторую математическую конструкцию, адекватную исследуемому объекту по принятым критериям, быть ориентированной на использование определенных математических методов, быть удобным инструментом для управления процессом. Такая модель будет моделью принятия эффективных решений.

При изучении вопроса выбора оптимальных режимов резания при токарной обработке на тяжелых токарных станках учитывалось, что функция

мощности резания ( $N$ , кВт) не может быть единственным критерием оптимальности с точки зрения экономии энергоресурсов. Обязательно необходимо учесть значения основного ( $t_o$ , мин) и вспомогательного ( $t_b$ , мин) времени, так как на тяжелых станках во время смены инструмента станок продолжает потреблять энергию. Эти две функции, в зависимости от цели оптимизационного расчета, могут выступать в качестве как целевых функций, так и функциональных нелинейных ограничений. Важными критериями оптимизации в рассматриваемом случае являются функция расхода инструмента ( $R_u$ , шт) и функция затрат ( $A$ , д.е.), а также производительность труда ( $t_{шт}$ ) и расход твердого сплава ( $R_c$ ) [12]. Анализ показывает целесообразность включения в математические модели следующего набора управляемых в определенном диапазоне факторов: скорость резания ( $v$ , м/мин), подача ( $s$ , мм/об), глубина резания ( $t$ , мм), размеры твердосплавной пластины ( $h, l$ , мм). Необходимые целевые функции, оптимизируемые при определенных ограничениях, накладываемых на управляемые переменные, строятся с использованием статистических данных. Пределы, в которых изменяются принятые переменные, представляют собой ограничения и определяются на основе статистических данных за рассматриваемый период.

Вначале анализировалась функция мощности резания ( $N$ , кВт). Так как модель  $N = N(t, s, v)$  является нелинейной функцией нескольких переменных, то для предварительного предположения о наличии точки экстремума можно рассмотреть линии уровня – проекции сечения исследуемой поверхности плоскостями  $N = \text{const}$  (рис.1).

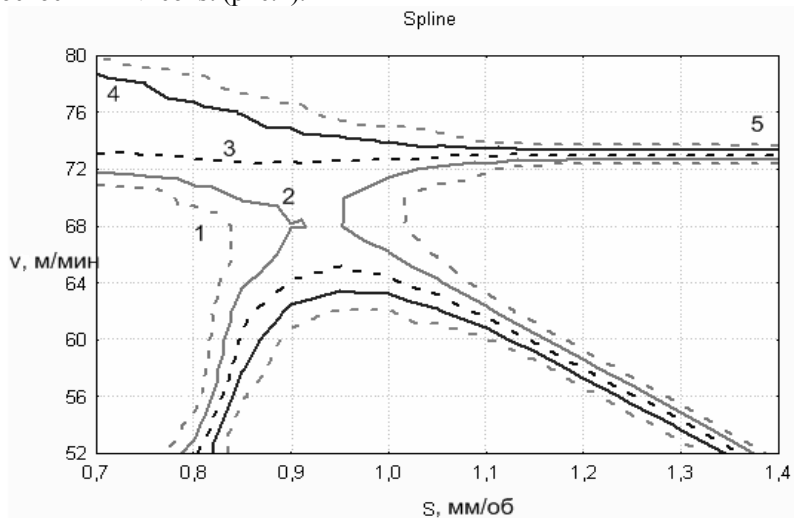


Рис. 1 – Линии уровня функции мощности резания для переменных: скорость резания ( $v$ , м/мин) и подача ( $s$ , мм/об):

1 - N=8,3 кВт, 2 - N=10,7 кВт, 3 - N=13,0 кВт, 4 - N=15,3 кВт, 5 - N=17,7 кВт

Анализ приведенных графиков показывает, что в рассматриваемом диапазоне значений переменных возможно нахождение локальных минимумов. Указанные графики можно использовать как номограммы для назначения режимов резания при заданном значении мощности резания.

Известно, что значения целевых функций и управляемых переменных в многокритериальных задачах оптимизации при различных безусловных минимумах могут значительно различаться. Особенно это заметно при сравнении «противоречивых» критериев, для которых отношения значения первого при минимуме второго к абсолютному минимуму первого будет максимальным.

В данной работе в качестве таких критериев рассматривались следующие целевые функции: штучное время (как величина, обратная производительности труда) и мощность резания. Так как обе рассматриваемые целевые функции нелинейны, то для нахождения оптимального плана задачи использовался квазиньютоновский метод оптимизации с использованием квадратичной экстраполяции вдоль касательного вектора в каждом одномерном поиске, задаваемая относительная погрешность – 0,000001. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения показателей частных минимумов целевых функций

№ точки	s, мм/об	v, м/мин	N, кВт	t <sub>шт</sub> , мин	$\frac{N(t_{шт}, \text{мин})}{N_{\text{min}}}$	$\frac{t_{шт}(N_{\text{мин}})}{t_{шт \text{ min}}}$	s, %	v, %
Глубина резания t=4 мм								
1	0,9	135	11,4	64,6	2,6%	3,31%	5,3%	2,1%
	0,95	132,2	11,7	62,53				
2	0,75	145	10,6	72,1	10,4%	15,30%	21,1%	9,7%
	0,95	132,2	11,7	62,53				
3	1,00	129,5	11,9	60,6	8,4%	11,40%	16,7%	7,6%
	1,2	120,4	12,9	54,4				
4	1,1	124,6	12,4	57,3	7,3%	10,62%	15,4%	6,9%
	1,3	116,6	13,3	51,8				
Глубина резания t=8 мм								
1	0,75	130,4	19,8	80,2	5,6%	7,8%	11,8%	5,1%
	0,85	124,1	20,9	74,4				
2	0,9	121,3	21,4	71,9	1,9%	3,3%	5,3%	2,2%
	0,95	118,7	21,8	69,6				
3	1,00	116,3	22,3	67,5	7,6%	11,6%	16,7%	7,6%

	1,2	108,1	24,0	60,5				
4	1,1	111,9	23,2	63,8	6,9%	10,6%	15,4%	6,9%

Было рассмотрено, как меняются переменные и критерии при переходе от минимума одного критерия к минимуму другого. Критерии рассматривались в порядке снижения производительности труда, а для графического представления материала в качестве аргумента был выбран критерий мощности резания ( $N$ , кВт). Можно видеть (табл.1), что увеличение значения штучного времени на 3..15% приводит к уменьшению мощности резания на 3..10%. Из рассматриваемых переменных наиболее сильно влияет на значение целевых функций подача, которая при указанном уменьшении мощности может уменьшаться до 21%. Изменение скорости резания также является однонаправленным и лежит в пределах 2..10%. Одновременное увеличение обоих параметров положительно влияет на величину штучного времени, уменьшая его, и отрицательно – на величину мощности резания.

Нанеся на кривую Парето точки безусловных минимумов критериев  $t_{шт}$  и  $N$  (рис.2), получаем возможность, двигаясь вдоль этой кривой, выбрать режим резания, более точно соответствующий текущим требованиям производства.

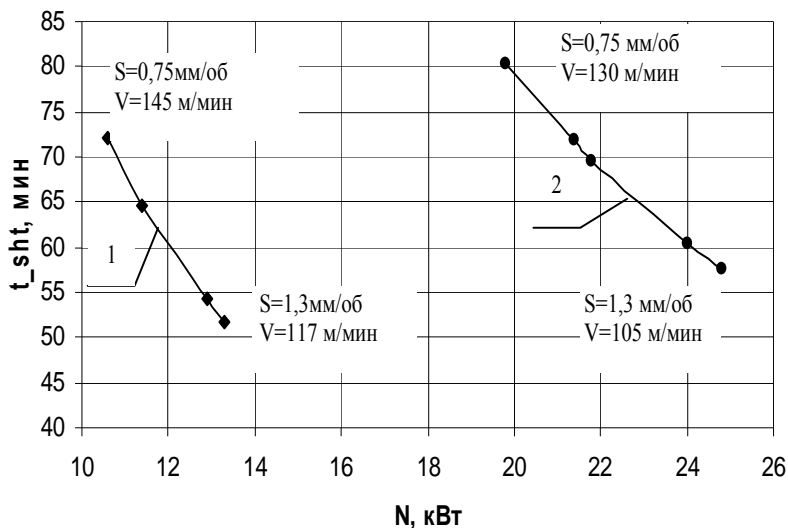


Рис. 2 – Кривая Парето для функций штучного времени  $t_{шт}$  и мощности резания  $N$ : 1 -  $t=4$  мм, 2 -  $t=8$  мм

Можно видеть, что при повышении производительности труда значение подачи возрастает в рассматриваемом диапазоне от наименьшего к наибольшему для различных глубин резания ( $t=4$  мм и  $t=8$  мм). При уменьшении значения мощности резания, очевидно, возрастает скорость резания: от 117 м/мин до 145 м/мин при  $t=4$  мм и 105-130 м/мин при  $t=8$  мм.

Следующим этапом работы был анализ процесса черновой обработки на тяжелых токарных станках, при котором режущая часть инструмента подвергается сложным воздействиям механических и тепловых нагрузок. Традиционно считалось, что при снятии больших сечений среза необходимо повышать подачу при одновременном уменьшении скорости резания.

Анализировались статистические данные наблюдений за процессом обработки при черновом точении на тяжелых токарных станках резами со специальными твердосплавными пластинами, на которые нанесено износостойкое покрытие GC 4025, состоящее из слоя  $Al_2O_3$ ,  $Ni(CN)$ , и износостойкого слоя  $TiN$ . Общая толщина покрытия составляет 12 мкм. Основа сплава имеет высокую твердость с повышенным содержанием кобальта, что увеличивает нагрузочную прочность режущей кромки. При обработке конструкционных сталей глубина резания составляла  $t=15-35$  мм, а подача  $s=0,7-1,8$  мм/об.

Анализ показал, что в определенной области подач и скоростей резания зависимости  $N(s,v)$  имеют изгибы (рис.3), что указывает на нелинейное влияние значений режимов на мощность резания.

Проведенный на основании этих данных расчет рекомендуемых режимов резания с точки зрения минимума энергозатрат (табл.2) подтвердил эффективность применения многогранных пластин с многослойными покрытиями при черновой обработке на тяжелых станках за счет увеличения скорости резания и незначительном уменьшении подачи.

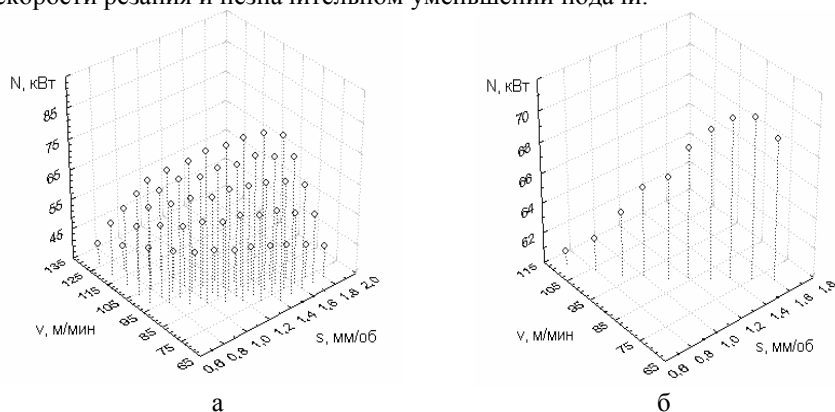


Рис. 3 – Зависимость значения мощности резания от подачи ( $s$ , мм/об) и скорости резания ( $v$ , м/мин)

а – глубина резания  $t=15-35\text{мм}$ ; б – глубина резания  $t=25\text{мм}$

Таблица 2

Выбор режимов резания для черногого точения валковых сталей на тяжелых токарных станках (глубина резания  $t=25\text{мм}$ )

Подача ( $s$ , мм/об)	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Скорость резания ( $v$ , м/мин)	111	104	98	94	89	86	82	79	75	71
Мощность резания ( $N$ , кВт)	60,8	62,1	64,2	65,9	66,8	68,6	69,8	70,5	70,6	69,3

Представляет интерес вопрос возможного варьирования значений указанных режимов резания при условии неизменности значения мощности резания. Для этого для функции  $N(t,s,v)$  использовался расчет норм замещения факторов:

$$h_{ij} = -\frac{a_j}{a_i} \frac{\bar{X}_i}{X_j} \quad (i, j = 1, 2, 3).$$

Для рассматриваемого частного случая ( $N = 0,02ts^{0,7}v^{1,04}$  при  $t=25\text{мм}$ ) эти нормы составляют:

$$\begin{aligned} h_{ts} &= -15,2, \quad h_{st} = -0,07, \\ h_{tv} &= -0,29, \quad h_{vt} = -3,42, \\ h_{sv} &= -0,02, \quad h_{vs} = -52,03. \end{aligned}$$

Вычисленные нормы замещения показывают что варьирование значений режимов возможно в паре  $t-v$ : при увеличении глубины резания на 1 мм скорость можно уменьшить на 0,29 м/мин для сохранения значения мощности.

**Выводы.** Для формирования энергосберегающих технологий на предприятиях первоначально необходимо исследование технологических факторов, которые определяют электропотребление, и, на этой основе, построение оптимизационных моделей энергоэффективности объекта управления. Реализация такого подхода требует не одного, а нескольких критериев, влияющих на эффективность работы. Выделены наиболее существенные из них – приведенные затраты ( $A$ ), производительность труда ( $t_{шт}$ ), расход твердого сплава ( $R_c$ ), мощность резания ( $N$ ).

Включение в систему целевых функций для МКО функции мощности резания позволяет выявить оптимальные режимы процесса механообработки, минимизирующие в определенных пределах энергозатраты. Показано, что при глубине резания  $t=4$  мм, для уменьшения мощности резания на 10% подача должна быть уменьшена на 21%, а скорость резания увеличена на



10% (при  $t=8$  мм соответствующие значения составят 7,6%; 16,7%; 7,6%). Это указывает на целесообразность использования твердосплавных пластин с покрытиями, которые позволяют работать с меньшей подачей и большей скорости резания.

Построены кривые Парето, которые позволяют выбрать «компромиссные» режимы резания, отличные от режимов при абсолютных минимумах рассматриваемых критериев.

Проведенные исследования показали эффективность применения многогранных пластин с многослойными покрытиями при черновой обработке на тяжелых станках за счет увеличения скорости резания и незначительном уменьшении подачи. Применение специальных пластин из сплава GC 4025 позволяет увеличить скорость резания в 1,5 раза при стойкости 60...120 мин.

**Список литературы:** 1. *Ковалко М. П.* Энергобережения – досвід, проблеми, перспективи – К.: Ін-т електродинаміки НАНУ, 1997. – 152 с. 2. *Соловцев С. С.* Приоритетные направления совершенствования производства точных коротких заготовок из сортового проката// Кузнечно-штамповочное производство. – М.: Машиностроение, 1990. -№7. –С.8-11. 3. *Бойко Ю. В.* На Украине возможен экономический прорыв// Киевский телеграф. 2006. -№5(299) –С.3. 4. *Мрочек Ж. А., Шатуров Г. Ф.* и др. Снижение энергоемкости процессов металлообработки при использовании ресурсосберегающих технологий. // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии. Тез. докл. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Под ред. А. И. Свириденка, В. А. Бородули. – Гродно: ГрГУ, 2005. С.20-21. 5. Энергосбережение в металлообработке: монография/ *В. С. Гузенко, А. В. Маковецкий* и др. – Краматорск: ДГМА, 2007. - 264с. 6. <http://www.hipre.hut.fi/> 7. <http://nimbus.mit.jyu.fi/> 8. *Schittkowski K.* EASY-OPT: An interactive optimization system with automatic differentiation - User's guide, Report, Department of Mathematics, University of Bayreuth, D-95440Bayreuth. 9. *Карпенко А. П., Мухлисуллина Д. Т.* Информационная модель и основные функции программной системы многокритериальной оптимизации «Парето»// <http://technomag.edu.ru/doc/90282.html> 10. *Краснокутская Л. В., Хаेत Г. Л.* Принятие решений при многокритериальной оптимизации// Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. статей. Вып.6.-Краматорск:ДГМА, 1996.-С.92-109. 11. Теория проектирования инструмента и его информационное обеспечение: маркетинг, квалиметрия, надежность и оптимизация// *Г. Л. Хаेत, В. С. Гузенко* и др.: Под общ. ред. Г.Л.Хаета. -Краматорск:ДГМА, 1994. - 370 с. 12. *Мироненко Е. В., Васильева Л. В.* К определению весомости критериев при оптимизации выбора режущего инструмента и режимов резания// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. –Краматорськ: ДДМА, вип. 16, 2004. – с.159-165.

*Поступила в редколлегию 08.09.10г.*