



Ключевые слова:
энергоэффективность, энергонасыщенность, металлообработка, технологический процесс, способ обработки

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

ЧАСТЬ 1. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Александр КУЗНЕЦОВ, Анна КАЛЯШИНА

Приведен анализ существующих методик оценки энергоэффективности металлорежущих станков. Описан разработанный методологический подход создания системы взаимосвязанных частных показателей энергоэффективности, таких как уровень потенциальной и фактической энергоэффективности, уровень эффективности энергонасыщенности и т. п. Показана принципиальная возможность использования данной методики для анализа сравнительной энергоэффективности различных моделей оборудования.

В настоящее время создано большое число способов обработки, получения и формирования деталей и изделий, технологических процессов и оборудования для их осуществления. Тенденции повышения производительности, точности, надежности, гибкости, экономичности и эффективности как производственного и технологического оборудования, так и систем машин, создание производств со всем меньшим участием человека, потребность в разработке перестраиваемых и переналаживаемых производств на базе оборудования с переменной структурой, с широким спектром технологических методов воздействия на объект производства требуют разработки новых системных методов анализа.

Это вызывает необходимость более глубокого и всестороннего структурного описания и анализа элементов системы, их связей и отношений, взаимодействия между элементами системы и окружающими системами и их элементами, состояний и свойств, а также физических процессов и явлений, протекающих при воздействии на систему и внутри нее.

С этой точки зрения наиболее общую и системную модель, которая представляет технологию, а на ее основе построены машины и оборудование, реализующие эту технологию, предложил И.И. Артоболевский: «Машина есть устройство, выполняющее механические движения для преобразования материи, энергии и информации», то есть в основу системы положены элементы (материя, энергия и информация) без определения типа отношений между ними.

В стандарте DIN 8580-2003-09 технологические процессы классифицируют на следующие виды технологий: 1 – первичное формообразование – заготовительные (в основном литейные виды), 2 – технологии пластического деформирования материала, 3 – обработка резанием (3.1 – геометрически определенным лезвием, 3.2 – абразивная обработка, 3.3 – процессы резки, вырубки), 4 – процессы сварки, сборка и сборочные процессы, 5 – нанесение покрытий, 6 – изменение свойств материала (табл. 1). То есть в основу положена структура свя-

зей материала как системы: 1 – связи образующие новый материальный объект, 2 – связи сохраняющие, 3 – связи разрушающие, 4, 5 – связи увеличивающие, 6 – изменяющие свойства внутренних связей материала, иными словами в основу положены виды внутренних связей и их отношений, а в качестве элементов приняты атомарное или молекулярное строение вещества.

Типовой процесс обработки определяют как отдельный этап производства готовой продукции, в процессе которого преобразуется сырье, а заготовка в процессе обработки обретает прибавочную стоимость. Сыре (или деталь, обработанная на предыдущем этапе) являются исходными элементами. Выходными элементами являются либо деталь, форма которой после обработки становится ближе к требуемой, либо воздействие обработки на окружающую среду (например, загрязнение микрочастицами или шум). К исходной информации и параметрам регулирования типового процесса обработки относятся: параметры продукции, параметры процесса обработки, методология управления процессом обработки. К ресурсам, необходимым для выполнения типового процесса обработки относятся: производственное оборудование, энергия, трудовые ресурсы.

Типовые процессы обработки делятся по данным Национального исследовательского совета (США) на пять категорий физических процессов:

- процессы изменения массы: процессы съема материала – механическая, электрическая и химическая обработка, а также нестандартные виды обработки, как электроэррозионная и электрохимическая;
- процессы фазовых изменений: процессы преобразования жидкой (или газовой) фазы материала в твердую – литье металлов, пропитка композитов, инжекционное прессование полимеров;
- процессы структурных изменений: процессы изменения микроструктуры всей заготовки или определенной ее поверхности – термообработка, процессы упрочнения поверхности;
- процессы деформирования: изменение формы твердой заготовки (без изменения ее массы и химического состава) – прокатывание, ковка, глубокая вытяжка и волочение;
- процессы объединения (соединения): процессы соединения частиц, волокон, твердых фаз с целью создания детали или компонента – порошковая металлургия, прессование керамики, прессование композитов на основе полимерных матриц, сварка, пайка.

Таким образом, технологические процессы как система описываются структурой (видом) физических изменений, как элементов систем без определения и рассмотрения отношений между элементами.

Учитывая сказанное, под технологическим процессом будем понимать процесс взаимосвязанного преобразования материи, энергии и информации, в процессе которого осуществляется изменение свойств и/или состояния, структуры, положения поступившей на вход материи, под воздействием поступающей на вход энергии в соответствии с заданной информацией. Материя, энергия и информация по времени поступления на вход и по времени преобразования и взаимодействия могут совпадать или не совпадать друг с другом.

Технологический процесс считается завершенным тогда и только тогда, когда достигается равенство информации, заключенное в материальном объекте (продукте, детали, изделии), со значением этой информации, заданной в виде чертежа – информационной модели материального объекта. Несоответствие (отклонение) информации, заключенной в материальном объекте о свойствах этого объекта, аналогичной информации о свойствах объекта, заключенной в чертеже изделия, характеризует точность (качество) технологического процесса, а свойство технологического процесса обеспечивать изготовление изделий в заданном объеме, сохраняя во времени информационное соответствие о свойствах изделия, заключенное в материальном изделии и его чертеже, характеризует надежность технологического процесса.

В зависимости от вида энергии, направленного и изменяющего состояние, структуру и свойства материала, количество и способ передачи информации различают виды реализуемых технологических процессов: обработку резанием (механообработка), обработку давлением, литье, сварку, термическую обработку, гибку и др.

Информация о количественных, качественных, геометрических параметрах, форме, структуре, состоянии, положении и их свойствах изделия (предмета, детали), заключенная в его описании или чертеже, является информационным образом изделия.

Информация о геометрических параметрах, форме и их свойствах изделия, заключенная в ее описании или чертеже, является геометрическим образом изделия.

Информация о последовательности преобразования материи, энергии и информации, заключенная в документах, определяющих модель последовательного достижения равенства (в широком смысле) информации в материальном объекте и его информационном образе, – технологический образ изделия.

Виды, форма, способы и процессы преобразования энергии, которые формируют соответствие детали ее информационному образу, входят в

Материлообрабатывающие станки

Таблица 1. Характеристики классификаций технологических процессов и способов обработки

Классификация	Принцип классификации	Критерий классификации	Преимущества
Национального исследовательского совета (США)	5 групп физических процессов: → изменения массы; → фазовых изменений; → структурных изменений; → деформирования; → объединения	Физическое изменение	Использование научных данных
По Тодду (R.H.Todd) и др. (США)	6 групп процессов формообразования: → уменьшение массы; → тепловое уменьшение массы; → химическое уменьшение массы; → сохранение массы; → объединение; → соединение 4 группы процессов обработки: → упрочнение; → размягчение; → подготовка поверхности; → нанесение покрытий	Форма: → изменяется → не изменяется	Проста в использовании
По стандарту DIN 8580-2003-09 (Германия)	6 групп процессов обработки: → первичное формообразование; → пластическое формообразование; → отделение материала; → соединение; → нанесение покрытий и финишная обработка; → изменение свойств материала	Формообразование Изменение свойства материалов	Используется в программе CO2PE! для определения характеристик процессов обработки
По Полу ДеГармо (E.Paul DeGarmo) (США)	7 групп процессов обработки: → литье или прессование; → формоизменение или резка; → обработка (съем материала); → термообработка; → финишная обработка; → сборка; → контроль	Литье Формоизменение свойства материала	Простота представления
По Эшби (M.F.Ashby) (Великобритания)	4 группы процессов обработки: → процессы первичного формообразования; → процессы вторичного формообразования; → соединение; → финишная обработка	Первичные и вторичные процессы	Простота представления
По MIL (США)	Этапы производства: → проектирование; → проектирование процесса и контроль; → снабжение материалами	Управление производством	Описываются этапы обработки

состав энергетического образа изделия. Количество энергии, необходимое для формирования одноименного свойства детали в соответствии с ее информационным образом, является характеристикой энергоемкости образа.

Образы, которые характеризуются неизменностью одного или нескольких свойств, будем называть единичными образами.

Образы, которые не изменяют свои заданные свойства, будем называть номинальными или

идеальными. Тогда реальные образы изделия описываются фактическими свойствами, формируемыми в технологическом процессе.

Информация о размере геометрических параметров, форме и свойствах изделий характеризует виды технологий:

- **нанотехнология** (характерный геометрический размер менее 10^{-7} – 10^{-9} м);
- **микротехнология** (характерный геометрический размер 10^{-7} – 10^{-3} м);

- *обычные или традиционные технологии* (характерный геометрический размер больше 10^{-3} м).

Изменения и отношения свойств соответствующих образов определяют их качественные и количественные параметры и характеристики, то есть определяют их качество. К таким показателям качества можно отнести показатели точности, производительности, надежности, энерго- и материо-лоемкости и т.п.

Например, точность технологического процесса определяется уровнем соответствия или степенью приближения реальных свойств, параметров и характеристик изделия (предмета, продукта или детали) его образу (информационному, геометрическому, технологическому) – номинальному, заданному или идеальному значению. Поэтому, необходимо различать следующие подвиды, объединенные термином «точность»:

- точность изделия;
- точность физического процесса;
- физически (реально) достижимая точность;
- технологическая точность;
- точность системы;
- структурная точность;
- эффективная точность и т. п.

Иными словами, точность, как свойство системы, при системном рассмотрении также является результатом взаимодействия связей и отношений элементов системы, которые в данном случае порождают, как сказано выше, новую систему, основным свойством которой является точность.

Производительность характеризует скорость достижения отдельных свойств технологического образа и/или свойств технологического образа в целом его информационному образу или равна количеству отображений (повторений) свойств технологического образа в единицу времени и т. п. Поэтому необходимо также – с позиции системного подхода – различать следующие подвиды понятия «производительность»:

- производительность физического процесса;
- технологическая производительность;
- достижимая производительность;
- реальная производительность;
- эффективная производительность;
- энергопроизводительность;
- производительность системы;
- структурная производительность и т. п.

Иными словами, производительность как свойство системы при ее системном рассмотрении также является результатом взаимодействия связей и отношений элементов системы, которые в данном случае порождают, как сказано выше, новую систему, основным рассматриваемым свойством которой является производительность.

Единый подход к оценке эффективности процессов, оборудования и производств с точки зрения общности методологической оценки позволяет рассматривать их как энергоинформационную модель (см. рис. 1), в которой происходит преобразование любых форм и видов энергии, материи и информации. Данный подход позволяет рассматривать понятие «эффективность» как относительный КПД совокупности всех видов преобразующих элементов системы.

Тогда **эффективность** – это степень использования какого-либо ресурса.

Производительность – это скорость изменения свойств, состояния, структуры материи.

Точность процессов, оборудования и производств определяется уровнем соответствия или степенью приближения объема информации о реальных свойствах, параметрах и характеристиках изделия (предмета, продукта или детали) объему информации номинальному, заданному или идеальному.

Следовательно, отношение объемов (энергий, мощностей, информации, времени и т. п.) на выходе E_j и на входе E_i является оценкой эффективности E_e , где числитель характеризует действительно используемый процессом, технологической машиной или производственной системой ресурс, а знаменатель – полезное (теоретически возможное) максимальное значение этого ресурса, обусловленное физическими явлениями этого процесса, оборудования или системы. Таким образом, во всех случаях использования ресурса имеем дело со следующими его величинами: идеальной (номинальной или теоретической) и реальной (фактической). Тогда можно записать выражение для оценки показателя эффективности:

$$E_e = \frac{E_{out}}{E_{inp}} \text{ или } E_e = \frac{E_{out}^f}{E_{out}^f + E_{out}^{ch}}, \quad (1)$$

где E_{out}^f – физические процессы применения ресурса; E_{out}^{ch} – процессы, обеспечивающие применение ресурса и его потери.

В общем виде, при использовании нескольких видов и форм ресурсов, получим:

$$E_e = \frac{\sum E_{out}^f}{\sum E_{out}^f + \sum E_{out}^{ch}}. \quad (2)$$

Сравнение процессов, оборудования и производств производят на основании отношения оценок их эффективности:

$$U_e = E_e^1 / E_e^2.$$

Выражение эффективности в виде (2) является универсальным методом оценки, поэтому оно применимо также к анализу любых видов процессов,

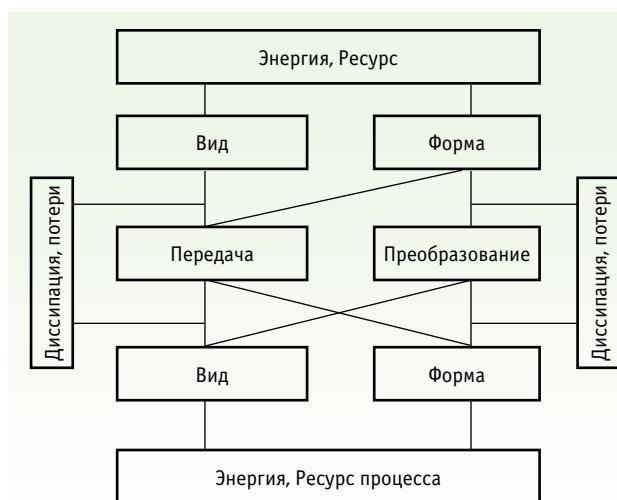


Рис. 1. Схема преобразования и передачи ресурсов

технологических машин и производственных систем, осуществляющих одновременное преобразование нескольких видов ресурсов, в частности несколько форм энергии, как в гибридных станках. Этот метод дает возможность сопоставлять степень совершенства протекающих процессов, что обусловлено возможностью учета всех видов потерь, как при переносе энергии, материи и информации от источника к преобразующим механизмам и устройствам, так и при преобразовании в них самих (рис. 1).

Как любой КПД общий КПД системы E_{te} равен произведению составляющих E_e^k вне зависимости от природы самого КПД:

$$E_{te} = \prod_{a=1}^k E_e^a . \quad (3)$$

Тогда интегральный показатель эффективности будет равен произведению эффективностей материи E_e^m , энергии E_e^e и информации E_e^{in} :

$$E_e^i = E_e^m \cdot E_e^e \cdot E_e^{in}. \quad (4)$$

Следовательно, сравнительная эффективность двух (1 и 2) процессов, оборудования и производства будет равна:

$$U^{ci} = \frac{(E_e^m \cdot E_e^e \cdot E_e^{in})^1}{(E_e^m \cdot E_e^e \cdot E_e^{in})^2} = U_e^{cm} \cdot U_e^{cie} \cdot U_e^{cin} = \\ = \frac{(E_e^m)^1}{(E_e^m)^2} \cdot \frac{(E_e^e)^1}{(E_e^e)^2} \cdot \frac{(E_e^{in})^1}{(E_e^{in})^2}, \quad (5)$$

где E_e^m – производительность; E_e^e – энергоэффективность; E_e^{in} – точность.

Рассмотрим применение вышеописанного общего методического подхода к оценке эффективности.

Европейская директива ECODESIGN определила энергоемкие области в промышленности, к числу которых относится и машиностроение. Европейский союз станкостроителей CECIMO разрабатывает в настоящее время директиву для производителей станков по внедрению энергосберегающих технологий. Стандартами ISO 14955 и ГОСТ РФ 54430-2011 предлагаются методики оценки энергоэффективности металлорежущих станков и их воздействия на окружающую среду, что способствует разработке требований по повышению энергоэффективности основных энергонасыщенных структурных элементов станков. Одним из проектов в области энергоэффективности является проект eniPROD «Энергоэффективные инновации продуктов и технологических процессов в технологии производства», который ставит перед собой задачу разработки научно обоснованных подходов к сбережению до 30% ресурсов и энергии в производстве.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Моделирование энергопотребления и оптимизации энергоэффективности предлагается рассматривать как понятие «КПД», на основе подробного описания факторов, влияющих на общий КПД производства.

Теоретический КПД станка рассматривается как отношение абсолютного минимума теоретически потребляемой энергии (E_{\min_abc}) и реального энергопотребления станка ($E_{\text{реал}}$):

$$\eta = \frac{E_{\min_abc}}{E_{\text{real}}} . \quad (6)$$

Отмечается, что абсолютный минимум теоретически потребляемой энергии невозможно рассчитать в условиях реального производства. Поэтому, КПД (энергоэффективность) можно представить как отношение достигнутого результата к затраченным усилиям:

$$\text{эффективность} = \frac{\text{результаты}}{\text{затраченные усилия}}. \quad (7)$$

В условиях производства результат и затраченные усилия можно представить в экономической форме (результаты – прибыль от производства, а затраченные усилия – затраты на изготовление детали). Аналогично стоимость продукции может быть выражена через энергию, затрачиваемую на изготовление данной продукции. Поскольку практически невозможно точно рассчитать эффективность производства для данной конструкции станка, эффективность (КПД) представляют как сумму нескольких слагаемых.

Обычно на первом этапе производства продукции разрабатывается производственная цепочка

(от сырья к готовой продукции). Помимо этого, для обеспечения эффективного использования ресурсов необходимо учитывать затраты на отходы и повторную переработку. Очень часто невозможно осуществить точный расчет эффективности (поскольку невозможно рассчитать теоретический минимум энергозатрат), поэтому производится сравнение абсолютных величин (например, учитываются полные энергозатраты):

$$E_{\text{продукции}} = E_{\text{материал}} + \sum_i E_{\text{этап}, i} + E_{\text{отходов}} = \min!. \quad (8)$$

Поскольку производственная цепочка состоит из отдельных этапов, полная эффективность определяется либо путем расчета оптимального набора этапов, либо путем расчета энергоэффективности каждого этапа в отдельности. При расчете энергии, затрачиваемой на процессы обработки, необходимо также учитывать вторичные энергозатраты. Например, при сравнении энергоэффективности лазерной резки и штамповки необходимо учитывать постоянные расходы на штамповочный инструмент ($E_{\text{пост. расходы}}$):

$$E_{\text{этап}, i} = E_{\text{элемент}, i} + E_{\text{пост. расходы}} / N, \quad (9)$$

где $E_{\text{элемент}, i}$ – энергия, затрачиваемая на обработку отдельного элемента; N – объем партии обрабатываемых деталей.

При выполнении операций резания (например, фрезерования и токарной обработки), целью выполнения которых является съем материала, на основе значений мощности обработки $P_{\text{обработки}}(t)$ интеграла энергии $E_{\text{интегр. энергии}}$, скорости съема материала $v_{\text{съема материала}}$ и объема снятого материала $V_{\text{снятого материала}}$ рассчитываются удельная потребляемая энергия $e_{\text{уд}}$ и удельная мощность обработки $P_{\text{уд. обработки}}(t)$:

$$e_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{интегр. энергии}}}{V_{\text{снятого материала}}}; \quad (10)$$

$$P_{\text{уд. обработки}}(t) = \frac{P_{\text{обработки}}(t)}{v_{\text{съема материала}}}.$$

Данная методика позволяет осуществлять сравнение энергоэффективности различных процессов обработки, но не учитывает качество обрабатываемой поверхности.

Эффективность (КПД) станка рассчитывается как отношение мгновенной мощности, потребляемой в процессе обработки ($P_{\text{процесса обработки}}(t)$), к реальному мгновенному энергопотреблению станка ($P_{\text{станка}}(t)$):

$$\eta_{\text{станка}}(t) = \frac{P_{\text{процесса обработки}}(t)}{P_{\text{станка}}(t)}. \quad (11)$$

Потребляемая мощность станка измеряется напрямую (на основе величины входной мощности). При резании мощность процесса обработки рассчитывается путем перемножения силы и скорости. Интегрированием мощности по интервалу времени, требуемому на обработку, рассчитывается потребляемая энергия и, как следствие, энергоэффективность станка на данном этапе:

$$\eta_{\text{станка}, i} = \frac{\int P_{\text{процесса обработки}}(t) dt}{\int P_{\text{станка}}(t) dt} \Big|_{t_{\min, i}}^{t_{\max, i}}. \quad (12)$$

Это уравнение показывает, что на величину реальной энергоэффективности станка влияет способ эксплуатации станка.

В ряде работ составление энергетического баланса осуществляется на основе сравнения входных и выходных параметров (при этом их суммы должны быть равны). Энергетический баланс описывается при помощи следующих параметров: подводимой от производственной системы входной энергии $E_{\text{вх}}$, равной сумме прибавочной энергии $E_{\text{прибав}}$, и потерь энергии $E_{\text{потерь}}$. Соотношение данных параметров описывается простым уравнением:

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{прибав}} + E_{\text{потерь}}. \quad (13)$$

Энергетический баланс станка предлагается также описывать следующим уравнением:

$$E_{\text{станка}} = E_{\text{процесса обработки}} + E_{\text{потерь станка}}. \quad (14)$$

Из уравнений видно, что $E_{\text{вх}}$ соответствует $E_{\text{станка}}$, $E_{\text{прибав}}$ соответствует $E_{\text{процесса обработки}}$, $E_{\text{потерь}}$ соответствует $E_{\text{потерь станка}}$. При этом полезная энергия (энергия процессов обработки) рассматривается вне границ системы (в качестве выходной характеристики), вследствие этого осуществляется сравнение тепловых потерь, возникающих в процессе преобразования и транспортировки энергетических потоков. Энергия процессов обработки обычно является механической энергией формообразования и энергией подвода вспомогательных сред. Тогда, энергетический КПД станка будет равен:

$$\eta_{\text{станка, (процессов обработки)}} = \frac{E_{\text{процесса обработки}}}{E_{\text{станка}}} = \frac{E_{\text{процесса обработки}}}{E_{\text{процесса обработки}} + E_{\text{потерь станка}}}. \quad (15)$$

Отмечается, что при помощи составления баланса нельзя рассчитать по отдельности характеристики технологических процессов и станка в целом. В данном случае допускается, что потребляемая в процессе обработки энергия является константой. Исходя из этого, энергетический КПД станка можно повысить либо путем увеличения

потребляемой в процессе обработки энергии, либо путем уменьшения потерь энергии. Кроме того, в процессе вспомогательных операций КПД станка падает до нуля (не тратится энергия процессов обработки). Для разработки станков со сниженным энергопотреблением необходимо уменьшить вспомогательное время станка (к примеру, уменьшить время подачи инструмента). Однако, ускорение процессов обработки и увеличение скоростей подачи приводит к возникновению новых проблем.

В ГОСТ РФ 54430-2011 «Материлообрабатывающее и деревообрабатывающее оборудование. Показатели энергоэффективности. Номенклатура. Методы определения и нормирования значений – энергетические параметры» описывается методика расчета различных энергетических параметров. Все параметры подразделяются на основные и вспомогательные, причем параметры определяются как на этапе проектирования, так и в процессе экспериментальных испытаний.

Поэтому предлагается проводить оценку энергетического КПД станка по ряду показателей.

КПД оборудования по электроэнергии (цикловой):

$$\eta_{\text{э.ц}} = W_{\text{э.ф}} / W, \quad (16)$$

где $W_{\text{э.ф}}$ – расход электроэнергии на процесс формообразования оборудованием за цикл обработки заданных деталей-представителей, кВт·ч; W – полный расход электроэнергии оборудованием за цикл обработки тех же деталей, кВт·ч.

Чем больше в цикле обработки детали доля времени на формообразование (меньше время холостых ходов) и интенсивнее режимы обработки, тем выше значение $\eta_{\text{э.ц}}$.

На повышение величины $\eta_{\text{э.ц}}$ влияют совершенствование конструкций оборудования, технологического процесса обработки детали и оптимизация процесса управления оборудованием.

Удельный расход электроэнергии (кВт·ч/ед. продукции):

$$\vartheta_y = W/n, \quad (17)$$

где W – полный расход электроэнергии оборудованием при изготовлении партии деталей-представителей, кВт·ч, n – число деталей.

При испытаниях оборудования на производительность $\eta_{\text{э.ц}}$ удобнее определять, измеряя не $W_{\text{э.ф}}$, а $W_{\text{ихх}}$ – расход электроэнергии оборудованием на холостом ходу при имитации обработки тех же деталей:

$$\eta_{\text{э.ц}} = 1 - W_{\text{ихх}}/W_{\text{п}}, \quad (18)$$

где $W_{\text{п}}$ – полный расход электроэнергии оборудованием за цикл обработки деталей-представителей при испытаниях, кВт·ч.

Коэффициент использования оборудования по электроэнергии (цикловой):

$$K_{\text{вц}} = W_{\text{o}} / W_{\text{o.h}}, \quad (19)$$

где W_{o} – фактический расход электроэнергии оборудованием при обработке заданных деталей, кВт·ч, $W_{\text{o.h}}$ – номинальный расход электроэнергии, кВт·ч.

$$W_{\text{o.h}} = \Sigma P_{\text{o.h}} \cdot T_{\text{ц}}, \quad (20)$$

где $\Sigma P_{\text{o.h}}$ – суммарная номинальная мощность установленных на оборудовании электродвигателей, кВт·ч, $T_{\text{ц}}$ – время цикла обработки.

Коэффициент использования оборудования по мощности (цикловой):

$$KP_{\text{ц}} = P_{\text{o}} / \Sigma P_{\text{o.h}}, \quad (21)$$

где P_{o} – средняя (взвешенная по времени цикла) потребляемая мощность, кВт.

Дополнительные показатели $K_{\text{вц}}$ и $K_{\text{рц}}$ позволяют оценить загрузку электродвигателей оборудования и уровень использования их потенциальных возможностей, определяемых полной загрузкой двигателей в течение всего цикла обработки.

Расход электроэнергии определяется суммой электроэнергии в приводах, системах, устройствах оборудования при его работе:

$$W_{\text{o}} = W_{\text{пп}} + \Sigma W_{\text{пп}} + \Sigma W_{\text{всп}} + W_{\text{уп}} + W_{\text{ос}} \text{ (кВт·ч)}, \quad (22)$$

где индексы пп , пп , всп показывают, что расходы электроэнергии относятся к главному приводу, приводам подач и вспомогательным приводам длительного и кратковременного действия, индекс уп – к системам, устройствам управления и автоматики, ос – к освещению.

Энергии в приводе, системе и устройстве определяются по зависимости:

$$W_{\text{п.с.у}} = W_{\text{эф}} + \Sigma \Delta W \text{ (кВт·ч)}, \quad (23)$$

где $W_{\text{эф}}$ – расход электроэнергии на полезную работу, кВт·ч; то есть расход электроэнергии на процесс формообразования (резанием или пластическим деформированием) за цикл обработки либо – измеряется расход электроэнергии на холостом ходу при имитации обработки тех же деталей (без удаления или деформирования материала детали).

$\Sigma \Delta W$ – суммарный расход электроэнергии на потери в механической, гидравлической и электрической частях привода (системы, устройства), кВт·ч.

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Единый подход к оценке энергоэффективности станков с точки зрения общности методологической оценки будем рассматривать как энергоинформационную модель преобразователя любых форм энергии и рассматривать понятие энергоэффективность как относительный КПД всей совокупности энергопреобразующих механизмов и устройств. Следовательно, отношение мощностей на выходе E_j и на входе E_i является оценкой энергоэффективности. В этом случае числитель характеризует действительно совершающую станком в нашем случае (или технологической в общем случае) полезную работу, а знаменатель характеризует ее теоретически возможное значение:

$$E_{\text{эф}} = E_j / E_i. \quad (24)$$

Выражение энергоэффективности через формулу (24) является достаточно универсальным видом оценки, так как применим к анализу многофункциональных станков (технологических машин), которые осуществляют и одновременное преобразование нескольких видов энергии, а также дает возможность сопоставить по степени совершенства протекающие в станках процессы, так как этот показатель учитывает все виды потерь, как при переносе энергии от источника к энергопреобразующим механизмам и устройствам, так и при преобразовании энергии в них самих.

Единство феноменологических законов, которые описывают процессы преобразования различных форм энергии, обуславливает их независимость от конструктивного, компоновочного, технического и технологического исполнения станков, которые, согласно модели, осуществляют такие процессы, позволяют проводить их сравнение как энергопреобразующих систем. Эта модель как система должна включать как начальные условия, задаваемые величиной энергопотоков физических процессов на «холостом ходу» станка, так и граничные условия, определяемые фактическими значениями энергопотоков на режимах работы станка.

Таким образом, сведенные в табл. 2 методы оценки энергоэффективности металлорежущих станков для их оценки и сравнения должны обладать одинаковыми начальными и граничными условиями, что, в свою очередь, создает необходимость рассмотрения структуры энергопотоков, которые для однотипных станков должны быть аналогичны.

Таким образом, подходы к методам оценки энергоэффективности металлорежущих станков основываются на одной и той же методологической базе – энергоэффективность определяется как отношение выходных значений параметров к параметрам на входе. Однако различия, при этом единобразии, заключаются в определении входных и выходных энергетических параметров, методах их расчета или измерения, структуре, оценке, а также в понимании процесса формирования значений этих параметров и рассмотрении системы и структуры станка с одной стороны как технологической системы построенной на базе станка, а с другой стороны, как элемента производственной системы.

Таблица 2. Методы оценки энергоэффективности

Показатель энергоэффективности $E_{\text{эф}} = E_j / E_i$	Содержание выражения E_i	Содержание выражения E_j	Наименование показателя
$\eta_{\text{станка}}(t) = \frac{P_{\text{процесса обработки}}(t)}{P_{\text{станка}}(t)}$	$P_{\text{процесса обработки}}(t)$ – мощность процесса обработки: произведение силы и скорости	$P_{\text{станка}}(t)$ – энергопотребление станка	Эффективность (КПД) станка
$\eta_{\text{станка}} = \frac{E_{\text{процесса обработки}}}{E_{\text{процесса обработки}} + E_{\text{потерь станка}}}$	$E_{\text{процесса обработки}}$ – энергия главного привода, приводов подач и энергия подвода вспомогательных сред	$E_{\text{потерь станка}}$ – суммарные энергопотери в станке	Энергетический КПД станка
$\eta_{\text{э.ф.}} = \frac{E_{\text{э.ф.}}}{E}$	$E_{\text{э.ф.}}$ – расход электроэнергии на процесс формообразования оборудованием за цикл обработки заданных деталей-представителей, кВт·ч;	E – полный расход электроэнергии оборудованием за цикл обработки тех же деталей, кВт·ч	КПД оборудования по электроэнергии (циклический)

В качестве выходного энергетического параметра различные авторы понимают либо мощность процесса обработки (произведение силы и скорости), либо суммарную энергию приводов подач подвода вспомогательных сред, либо расход электроэнергии оборудованием на процесс формообразования за цикл обработки заданных деталей представителей. Это обуславливает различие в формулировках физической сущности предлагаемых показателей энергоэффективности. Соответственно, поскольку база сравнения не является достаточно строгой, независимой и инвариантной по отношению к рассматриваемой системе металлорежущий станок – технологическая система (или производственная система), проведение сравнительных оценок металлорежущих станков по предлагаемым зависимостям не является, строго говоря, корректным и адекватным.

Нами предлагается методология оценки энергоэффективности металлорежущих станков, которая базируется на модели процесса получения детали как процесса преобразования материи, энергии и информации.

Введем следующие обозначения:

- $E_{\phi\pi}$ – энергия, требуемая для физического процесса резания – пластического деформирования материала;
- E_{dp} – энергия, требуемая для процессов создания формы – геометрических образов детали;
- $E_{\pi\phi\pi}$ – подводимая энергия, требуемая для физического процесса резания и других процессов, в том числе и иной физической природы, обеспечивающих этот процесс;
- $E_{\pi dp}$ – подводимая энергия, требуемая для процессов создания формы – геометрических образов детали – и для других процессов, в том числе и иной физической природы, обеспечивающих этот процесс;
- $U_{\phi\pi\pi} = \frac{E_{\phi\pi}}{E_{\phi\pi} + E_{dp}}$ – уровень потенциальной энергоэффективности металлорежущих станков.

Тогда, на основании (24) запишем:

$$U_{\phi\pi} = \frac{E_{\phi\pi} + E_{dp}}{E_{\pi\phi\pi} + E_{\pi dp}}. \quad (25)$$

Выражение (25) позволяет оценить интегральный показатель уровня энергоэффективности станка, так как входящие в него величины полностью описывают энергетические процессы проходящие в металлорежущем станке. Причем в этом случае базой сравнения является нормированная величина физического процесса резания и физического процесса формообразования. Это положение является существенным, учитывая, что количество удельной энергии формоизменения

Таблица 3. Удельная энергоемкость видов обработки

Вид обработки	Физический процесс	Удельная энергоемкость кДж/см ³
Точение	Пластическая деформация	1–10
Фрезерование	Пластическая деформация	1–10
Абразивная резка	Плавление	10–30
Черновое шлифование	Плавление	20–60
Чистовое шлифование	Плавление	60–200
Электроэррозионная	Испарение	100–1000
Электрохимическая	Ионизация	500–2000
Лучевая	Ионизация	100–3000

при необратимой деформации является величиной для данных условий постоянной, не зависящей от схемы деформации, определяемой только свойствами деформируемого материала.

В качестве примера в табл. 3 приведены значения удельной энергоемкости различных физических процессов, реализуемых в станках.

Следовательно могут быть получены значения энергоемкости или удельной энергоемкости как физического процесса резания, так и геометрических образов формируемых станков. Таким образом, числитель выражения (25) является нормированной величиной базы сравнения, а все изменения энергоизменений в станке, в том числе и вся подводимая энергия к структурам станка, рассматривается в качестве переменного параметра и фигурирует только в знаменателе выражения.

Проведем следующие преобразования выражения (25):

$$\begin{aligned} U_{\phi\pi} &= \frac{E_{\phi\pi} + E_{dp}}{E_{\pi\phi\pi} + E_{\pi dp}} = \frac{(E_{\phi\pi} + E_{dp}) \cdot E_{\phi\pi} \cdot E_{\pi\phi\pi}}{(E_{\pi\phi\pi} + E_{\pi dp}) \cdot E_{\phi\pi} \cdot E_{\pi\phi\pi}} = \\ &= \frac{\left(\frac{E_{\phi\pi} + E_{dp}}{E_{\phi\pi}}\right) \cdot E_{\pi\phi\pi}^{-1}}{\left(\frac{E_{\pi\phi\pi} + E_{\pi dp}}{E_{\pi\phi\pi}}\right) \cdot E_{\phi\pi}^{-1}} = \frac{\left(\frac{E_{\phi\pi} + E_{dp}}{E_{\phi\pi}}\right)}{\left(\frac{E_{\pi\phi\pi} + E_{\pi dp}}{E_{\pi\phi\pi}}\right)} \cdot \frac{E_{\phi\pi}}{E_{\pi\phi\pi}}. \end{aligned} \quad (26)$$

Рассмотрим составные элементы преобразованного выражения (26) и получим систему взаимосвязанных частных показателей уровня энергоэффективности металлорежущих станков:

- $U_{\text{эиэ}} = \frac{E_{\text{фп}}}{E_{\text{пфп}}} - \text{уровень эффективности использования подводимой энергии резания};$
- $U_{\text{фпр}} = \frac{E_{\text{пфп}}}{E_{\text{пфп}} + E_{\text{пдп}}} - \text{уровень фактической (реальной) энергоэффективности металлорежущих станков};$
- $U_{\text{ээн}} = U_{\text{эиэ}} \cdot U_{\text{фпр}} = \frac{E_{\text{фп}}}{E_{\text{пфп}} + E_{\text{пдп}}} - \text{уровень эффективности энергонасыщенности металлорежущих станков};$
- $U_{\text{пэн}} = \frac{U_{\text{фпр}}}{U_{\text{фпр}}} - \text{уровень повышения энергонасыщенности металлорежущих станков};$
- $U_{\text{пэн}} = \frac{U_{\text{фпр}}}{U_{\text{фпр}}} = \frac{E_{\text{фп}}}{E_{\text{пфп}}} \cdot \frac{E_{\text{пфп}} + E_{\text{пдп}}}{E_{\text{фп}} + E_{\text{дп}}} = \frac{U_{\text{эиэ}}}{U_{\text{эфи}}}$
- где $U_{\text{эфи}} = \frac{U_{\text{эиэ}} \cdot U_{\text{фпр}}}{U_{\text{фпр}}} - \text{интегральный показатель уровня энергоэффективности};$
- $U_{\text{уэфи}} = \frac{U_{\text{фпр}}}{U_{\text{эиэ}} \cdot U_{\text{фпр}}} - \text{интегральный уровень энергоэффективности}.$

Таблица 4. Область изменения показателей энергоэффективности

Наименование показателя	Зависимость	Область изменения
Уровень потенциальной энергоэффективности	$U_{\text{фпр}} = \frac{E_{\text{фп}}}{E_{\text{фп}} + E_{\text{дп}}}$	[0–1]
Уровень эффективности использования энергии	$U_{\text{эиэ}} = \frac{E_{\text{фп}}}{E_{\text{пфп}}}$	[0–1]
Уровень фактической (реальной) энергоэффективности	$U_{\text{фпр}} = \frac{E_{\text{пфп}}}{E_{\text{пфп}} + E_{\text{пдп}}}$	[0–1]
Уровень эффективности энергонасыщенности	$U_{\text{ээн}} = U_{\text{эиэ}} \cdot U_{\text{фпр}} = \frac{E_{\text{фп}}}{E_{\text{пфп}} + E_{\text{пдп}}}$	[0–1]
Уровень повышения энергонасыщенности	$U_{\text{пэн}} = \frac{U_{\text{фпр}}}{U_{\text{фпр}}} = \frac{E_{\text{фп}}}{E_{\text{пфп}}} \cdot \frac{E_{\text{пфп}} + E_{\text{пдп}}}{E_{\text{фп}} + E_{\text{дп}}} = \frac{U_{\text{эиэ}}}{U_{\text{эфи}}}$	
Интегральный показатель уровня энергоэффективности	$U_{\text{эфи}} = \frac{U_{\text{эиэ}} \cdot U_{\text{фпр}}}{U_{\text{фпр}}}$ $U_{\text{эфи}} = \frac{E_{\text{фп}} + E_{\text{дп}}}{E_{\text{пфп}} + E_{\text{пдп}}}$	[0–1]
Интегральный уровень снижения энергоэффективности	$U_{\text{уэфи}} = \frac{U_{\text{фпр}}}{U_{\text{эиэ}} \cdot U_{\text{фпр}}}$	[1–∞]

Таблица 5. Классификация металлорежущих станков по уровню их энергоэффективности

Уровень энергоэффективности $U_{\text{эфи}}$	Наименование уровня энергоэффективности	Значение уровня энергоэффективности
1	Низкий	0,5–0,65
2	Ниже среднего	0,65–0,75
3	Средний	0,75–0,8
4	Выше среднего	0,8–0,85
5	Высокий	0,85–0,9
6	Очень высокий	0,9–0,95
7	Предельно высокий	> 0,95

Следует отметить, что в приведенной классификации (табл. 5) дана лишь оценка интегрального уровня энергоэффективности, по иным показателям также требуется создание соответствующей базы нормирования.

Кроме того, в настоящей статье приведен только общий методологический подход без детализации некоторых аспектов создания более полной системы оценок, принципы которой изложены в описании концептуального подхода к проблеме энергоэффективности металлорежущих станков и не затрагиваются вопросы энергоэффективности производственных и технологических систем, а также иных видов технического оборудования.

На рис. 2 приведен пример реализации метода оценки энергоэффективности применительно к металлорежущим станкам, который реализует оценку уровня эффективности использования подводимой энергии резания $U_{\text{эиэ}} = \frac{E_{\text{фп}}}{E_{\text{пфп}}}$ и применяется

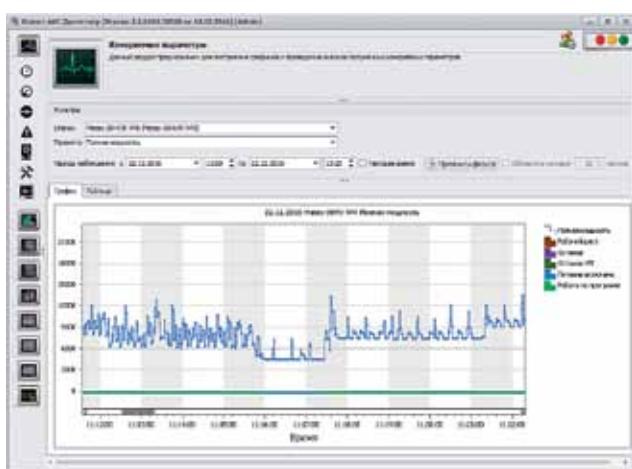


Рис. 2. Фрагмент измеряемой мощности станка



Рис. 3. Фрагмент контроля параметров нагрузки оборудования

в разработанной программно-аппаратной системе АИС «Диспетчер» (ООО ИЦ «Станкосервис» г. Смоленск).

В системе на платформе winnum (ООО «Сигнум» г. Москва) реализуется методология оценки уровня эффективности энергонасыщенности (см. табл. 4) металлорежущих станков и осуществляется мониторинг, который позволяет контролировать реальную нагрузку на оборудование, включая как непосредственно технологическое оборудование, так и всю периферию (компрессоры, гидростанции и т. п.) (рис. 3).

Таким образом, предлагаемый методологический подход позволяет решать задачи оценок энергоэффективности на разных уровнях детализации и глубины проводимых оценок и их анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Review on Sustainability Characterization for Manufacturing Processes / M. Mani, J. Madan, J.-H. Lee, et al. / USA, Geithersburg, National Institute of Standards and Technology / (NISTIR 7913). 2013. 22 p.
2. Кузнецов А.П. Структуры процессов и оборудования для обработки резанием. Ч. 1. Энергоинформационная модель структуры процессов // Вестник машиностроения. 2015. № 2. С. 73–83.
3. Dietmair A., Verl A. Energy Consumption for Casting and Optimization for Tool Machines // Modern Machinery Science Journal. 2009. V. 3. P. 62–67.
4. ГОСТ РФ 54430-2011. «Маталлообрабатывающее и деревообрабатывающее оборудование. Показатели энергоэффективности. Номенклатура. Методы определения и нормирования значений. Энергетические параметры». — М.: Стандартинформ, 2012.
5. Косов М.Г., Кузнецов А.П. Философское осмысление понятия «образ» в моделировании технологических процессов и машин // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. Т. 19. № 1. С. 148–155.
6. Кузнецов А.П. Тепловое поведение и точность металлорежущих станков. — М.: Янус-К, 2011. 256 с.
7. Kuznetsov P., Kosov M.G. Structural Precision of Metal_Cutting Machines // Russian Engineering Research. 2012. Vol. 32. No. 5–6. P. 482–490; P. Kuznetsov ,M. G. Kosov. Structural Precision of Metal_Cutting Machines // Russian Engineering Research. 2012. Vol. 32. No. 11–12. P. 725–730.
8. Кузнецов А.П. Тепловой режим металлорежущих станков. — М.: МГТУ «СТАНКИН», Янус-К, 2013. 480 с.
9. Резание металлов и инструмент / Под ред. А.М. Розенберга. — М.: Машиностроение, 1964. 227 с.
10. Кузнецов А.П., Ткачева О.Н. Современные системы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. — М.: НИИМаш, 1984. 72 с.
11. Кузнецов А.П. Методы оценки и контроля качества металлорежущих станков с ЧПУ. — М.: ВНИИТЭМР, 1985. 68 с.
12. Standard ISO 14955. Machine tools / Environmental evaluation of machine tools / Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools. — ISO/TC 39, 2012.
13. Götze U., Koriath H.-J., Kolesnikov A., Lindner R., Paetzold J. Integrated methodology for the evaluation of the energy- and cost-effectiveness of machine tools; CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 5 (2012) 151–163.

14. DIRECTIVE 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products, Official Journal of the European Union, L285:10.
15. Energy-Using Product Group Analysis — Lot 5 — Machine tools and related machinery; Executive Summary, Fraunhofer Gesellschaft, Berlin, August 9, 2012.
16. **Kuznetsov P.** Structure of cutting processes and equipment. Part 1. Energy-information model of the structure of machining processes // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35. No. 5. P. 347–357.
17. **Grigor'ev S.N., Kuznetsov A.P., Volosova M.A., Koriath H.-J.** Classification of metal-cutting machines by energy efficiency // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. Is. 3. P. 136-141.
18. **Grigoriev S.N., Kuznetsov A.P., Volosova M.A., Koriath H.-J.** Evaluation methods and classification of machine tools in terms of their energy-efficiency. — Innovations of Sustainable Production for Green Mobility. Energy-Efficient Technologies in Production. 3rd International Chemnitz Manufacturing Colloquium ICMC 2014., 3rd International Colloquium of the Cluster of Excellence eniPROD/Part 2: Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU, Technische Universität Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, ISBN: 978-3-95735- 005-3, 2014. P. 309–325.
19. **Kuznetsov A.P., Blau P., Koriath H.-J., Richter M.** Criteria for Energy-efficiency of Technological Processes, Technological Machines and Production Engineering Procedia CIRP. 7th HPC 2016 // CIRP Conference on High Perfomence Cutting / Published by Elsevier B.V. 2016. V. 46. P. 340–343.
-
- КУЗНЕЦОВ Александр Павлович –**
доктор технических наук, профессор кафедры станков МГТУ «СТАНКИН»/МГТУ им. Н.Э. Баумана, директор по науке, инжинирингу и инновационному развитию АО «СтанкоПром»
- КАЛЯШИНА Анна Викторовна –**
кандидат технических наук, доцент, КНИТУ – КАИ