



С.М. Вайцехович, Ю.В. Власов

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Предложен критерий комплексной экономической оценки объектов производства и эксплуатации, объединенных в техническую систему, оценивающий процессы создания и применения конструкционных материалов и деталей из них. Показана необходимость комплексного учета взаимозаменяемых деталей, входящих в техническую систему. Рассмотрены пути оптимизации технологических процессов, установлены зависимости между экономическими показателями, технологическими и техническими параметрами изделий. Обоснована необходимость комплексного учета взаимозаменяемости деталей, входящих в техническую систему, для экономической оценки создания и применения конструкционных материалов и деталей на их основе. Предложены математические выражения, позволяющие рассчитать предельную кратность работы деталей, номограммы затрат при различных кратностях ремонта, затраты на их изготовление и эксплуатацию. Предложена методика определения ожидаемых затрат по верхнему и нижнему пределам с учетом кратности работы деталей, затрат на ремонт и их полную замену. Методика построена на сравнительной оценке критериальных параметров, отражающих технико-экономические показатели альтернативных технологий и материалов, путем выявления рациональных затрат на изготовление и эксплуатацию отдельно взятых деталей с учетом дополнительных затрат на их замену и кратность ремонта.

Построены таблицы и номограммы затрат при различных кратностях ремонта деталей. Разработан универсальный экономический критерий, позволяющий при экономическом анализе технической системы пользоваться только технологическими и эксплуатационными показателями, входящими в техническую систему. Универсальный критерий получен в результате обобщения теоретических, экспериментальных исследований в области технологии, экономики и материаловедении, обслуживающих основные отрасли машиностроения. Разработан пакет программ, позволяющий при заданной кратности работы деталей с учетом минимальных затрат оптимизировать количество деталей, подлежащих ремонту, с учетом кратности этого ремонта, а также число заново изготавливаемых деталей.

Ключевые слова: техническая система, сборочная единица, кратность детали, ведущее звено, стойкость, эксплуатационные параметры, критериальные параметры, надежность работы, долговечность, моральный износ.

© Вайцехович С.М., Власов Ю.В., 2020

Вайцехович Сергей Михайлович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ФГУП «Научно-производственное объединение „Техномаш“ имени С.А. Афанасьева», e-mail: ask-mlad@mail.ru.

Власов Юрий Вениаминович – канд. техн. наук, генеральный директор ФГУП «Научно-производственное объединение „Техномаш“ имени С.А. Афанасьева», e-mail: info@tmnp.ru.

Для современной экономики сосуществование старых и новых методов, стилей, инструкций и т.д. является порочной нормой, и объективная причина этого не только инерция в мышлении и поведении людей, но и определяющий фактор, несовпадение целей производителя и потребителя. Первый, как правило, выступает в роли продавца и гаранта по ремонту и обслуживанию, второй – в роли покупателя и клиента. Скорее всего, такой симбиоз различных хозяйственных механизмов будет иметь место в обозримом будущем.

Вместе с тем в 1980-е гг. в России сделаны первые шаги по разработке экономико-математических моделей, которые могут быть фундаментальной основой экономики будущего. Их идея и задача – объединить интересы производителя и потребителя и представить как совокупный объект исследования для возможности провести самостоятельную экспертизу эффективности той или иной разработки или объекта потребления как с точки зрения технологической и эксплуатационной, так и экономической.

В настоящей работе представлены: методический подход к оценке экономической целесообразности изготовления и применения изделий и алгоритм, учитывающий функциональное назначение материалов и потребительскую надежность изделий.

В расчетах экономической эффективности изготовления изделий рассмотрены затраты как производителя [1, 2], так и потребителя [3, 4], при этом совокупность затрат принята за критерий оценки полезности рассматриваемого технического решения вне зависимости от области применения изделия [5].

В качестве объекта исследования выбрана техническая система как совокупность подсистем, узлов и т.д., в виде некоего конструктива, реализующего предмет исследуемой проблемы. Принято, что долговечность работы технической системы определяется путем оптимизацией таких параметров, как моральный срок службы и физический износ, выраженных через коэффициенты соответствия: K_T , K_σ , K_N и K_θ , K_Z , выбираемых из отраслевых банков данных, созданных на основе статистического анализа номенклатуры изделий, технологических переделов, сроков жизнеобеспечения технической системы, характерных для данной отрасли. Полученные данные корректируют с помощью экспериментальных зависимостей, в том числе исследованных в настоящей работе, представленных в виде номограмм и таблиц.

Моделирование материальных затрат на производство и потребление объектов технической системы строится по технологическим признакам и определяется универсальным экономическим критерием

$$K_T \cdot \frac{K_N}{K_\sigma} = \text{const},$$

который позволяет при экономическом анализе технических систем пользоваться только технологическими и временными зависимостями для отдельных деталей.

Рассмотрены две группы показателей затрат у производителя и потребителя продукции, совокупность которых отражает целесообразность реализации того или иного технического проекта вне зависимости от области его применения.

За критериальные параметры приняты:

- *У производителя*: степень надежности технологии [3, 6], позволяющая гарантировать повторяемость физико-механических свойств материала заготовки (детали) на каждой технологической операции (переделе); коэффициент соответствия K_T , отражающий зависимость изменения затрат от выбора технологической цепочки операций изготовления деталей. Например, на долговечность [7] работы деталей, полученных методом пластической деформации [8], влияют два основных параметра: величина предварительной деформации [3, 9] и способность материала детали к деформационному упрочнению [10, 11].

- *У потребителя*: кратность J работы деталей (критерий надежности работы технической системы) и коэффициент K_N соответствия экономических показателей эксплуатационным параметрам, где под кратностью работы детали понимается количество деталей, необходимое для удовлетворения морального износа технической системы.

Экономический расчет у потребителя основан на создании алгоритма, учитывающего функциональные особенности материалов и деталей на их основе в сфере эксплуатации (потребления), и определяет эксплуатационную стойкость детали и связанную с ней потребительскую цену.

Расчет технико-экономической эффективности технической системы ведется поэтапно.

На первом этапе следует рассматривать возможность снижения металло-, энерго- и трудоемкости изготовления деталей, входящих в одну какую-либо «низшую» сборочную единицу технической системы (например, подузел), и определить их рациональные затраты на его изготовление. Затем объединить их в сборочную единицу более «высокого» уровня (например, узел) и определить рациональные затраты соответственно на изготовление и эксплуатацию узла технической системы и т.д., вплоть до уровня технической системы в целом.

По мере повышения «уровня» сборочной единицы (подузел, узел, блок) рациональные затраты оптимизируются по числу остановов узлов, блоков и других сборочных единиц. При наличии уровней более высокого порядка (подсистем) проводится перерасчет общих затрат путем оптимизации числа простоев технической системы.

Долговечность технической системы складывается из долговечности (стойкости) входящих в нее деталей [12].

Вследствие дискретности данных по физическому износу деталей и, как правило, завышенных требований к моральному износу технической системы, используют несколько деталей, которые попеременно заменяют по мере физического износа каждой из них.

Все детали технической системы разбиваются по условиям работы в соответствии с воспринимаемыми ими видами нагрузок, и выбирается ведущая деталь (звено), ответственная за работоспособность устройства. Как правило, это может быть деталь, воспринимающая характерную наибольшую нагрузку (кручения, растяжения, сжатия).

Каждая отдельно взятая деталь блока в силу индивидуальности энергетического потенциала имеет свою физико-механическую стойкость и присущий срок службы, который может отличаться от срока службы других деталей, работающих с ней одновременно.

Для составления единой модели расчета выделяют деталь (ведущее звено) и ко времени ее физического износа приравнивают время физического износа остальных деталей, т.е. стойкость всех деталей приводится к единому знаменателю.

Деталь подвергается различным видам нагрузки, характерным для работы детали в узле технической системы: растягивающим напряжениям, ударному воздействию, крутящему моменту, абразивному трению и др. В процессе испытаний определяют основную причину разрушения детали, которая и будет являться ведущей нагрузкой для конкретной детали, причем ведущая деталь не обязательно будет выходить из строя раньше других.

Для ведущего звена, с учетом количества (объема) работы, выбирается тот или иной материал, исходя из физико-механических свойств и технологической себестоимости. Величина эксплуатационного параметра ведущего звена N_i является ориентиром для подбора материала деталей, входящих в рассматриваемый функциональный блок технического устройства. Одновременно с подбором материала осуществляется и выбор способа (технологии) получения детали.

Функциональный блок состоит из набора деталей, каждая из которых имеет свой эксплуатационный параметр N_i .

При этом $N_i = t_i$; или $N_i \cdot J_i = t$,

$$N_{p_i} = \sum_{i=1}^n N_i = t, \quad (1)$$

где N_i – эксплуатационный параметр отдельно взятой i -й детали; N_{p_i} – эксплуатационный параметр технической системы, состоящей из i -х деталей; $\sum_{i=1}^n N_i$ – работоспособность технической системы за полный период времени t ; t – полный период времени функционирования технической системы; t_i – время физического износа i -й детали; J_i – приведенная кратность работы i -й детали.

Временную характеристику рационального использования технической системы N_{P_i} можно представить функцией морального износа $\sum_{i=1}^n M_i$, выраженную в единицах времени (час, год и т.д.), который изменяется в пределах: $0 \leq M_i \leq \infty$.

Задача математического моделирования заключается в выборе оптимальных соотношений эксплуатационного параметра отдельно взятой N_i детали через коэффициент ее кратности J_i . Гибкость (варьируемость) методического подхода заключается в подборе оптимального соотношения $\frac{\sum_{i=1}^n N_i}{t}$, определяющего эффективность работы технической системы. Моральный износ $M_{из}$ определяется конкурентоспособностью технической системы, экономическими, социальными и другими факторами, физический износ – эксплуатационной стойкостью деталей, входящих в функциональные блоки технической системы.

Отношение физического износа отдельно взятой детали к моральному износу технической системы представляет собой критерий устойчивости работы технической системы:

$$g_i = \frac{N_i}{M_{из}}, \quad (2)$$

где g_i – показатель кратности i -й детали за время работы технической системы; N_i – физический износ отдельно взятой детали (эксплуатационная стойкость, эксплуатационный параметр); $M_{из}$ – эквивалент моральному износу технической системы.

Обратная величина $g_i^{-1} = P_i$ может быть выражена через приведенную кратность J , показывающую необходимое количество замен деталей за время эксплуатации технической системы; P_i – показатель кратности i -й детали, потребительский коэффициент, $P_i \sim J_i$, где J_i – приведенная кратность i -й детали изменяется в интервале времени t – фактического времени износа i -й детали: $0 \leq t \leq \infty$.

Могут иметь место следующие соотношения:

$$J = 0; t \gg N; J = 1; t = N; J = \infty; t \ll N; J < 1; t < N; J > 1; t > N.$$

Подбор указанного соотношения позволяет регламентировать количество замен функциональных элементов в технической системе (объекте исследования) в целях удовлетворения времени морального износа. Эксплуатационный параметр N является показателем долговечности работы, который в современ-

ных условиях выбирается в большей мере с учетом морального износа, чем физического. В качестве объектов исследования могут выступать как инструментальные, так и конструкционные материалы.

Под эксплуатационными свойствами инструментальных материалов, применяемых в качестве металлорежущего инструмента, понимается эксплуатационная стойкость – время работы до полного износа (амортизации).

Под эксплуатационными свойствами конструкционных материалов, объединенных в техническую систему, – комплексный учет, включающий: взаимозаменяемость деталей, согласования периодов замен в целях устранения незапланированных простоев и исключения аварийных ситуаций в работе технической системы.

Эксплуатационные параметры деталей машин и механизмов должны соответствовать требованиям, предъявляемым как к сопряженным с ними деталям, так и ко всей технической системе в целом, и могут быть выражены через физико-механические свойства материалов изделий с учетом трудозатрат, отраженных в цене.

На рис. 1 представлена номограмма зависимости эксплуатационного параметра N_i металлорежущего инструмента от химического состава твердого сплава и его цены.

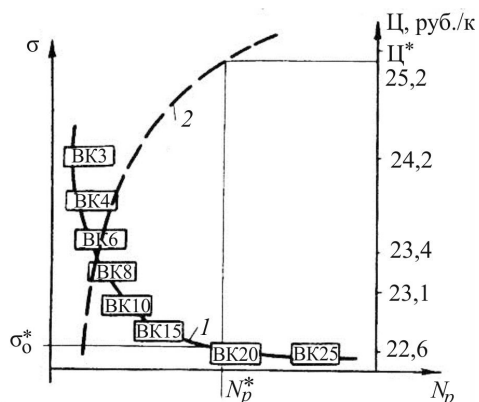


Рис. 1. Номограмма зависимости эксплуатационного параметра от химического состава твердого сплава и цены: Ц – оптовая цена; N – эксплуатационный параметр; σ – технологический параметр; 1 – зависимость прочности твердых сплавов от химического состава; 2 – зависимость цены от химического состава; \square – в рамках указана марка твердого сплава

В данном примере номограмма позволяет выбрать оптимальный эксплуатационный параметр детали – режущей пластины – при использовании твердого сплава в качестве инструментального материала.

Подобные номограммы можно построить для любого материала с учетом вида изделий и характера работы. Физико-механические свойства материалов

могут быть выражены по ведущему механическому параметру, характеризующему условия предназначенных работ. Для деталей, полученных методом пластической деформации, в общем случае долговечность до разрушения, как указано выше, обуславливается двумя основными параметрами: величиной предварительной деформации и способностью материала к деформационному упрочнению. Априорно физико-механические свойства в номограммах типа представленных на рис. 1 могут быть выражены по ведущему технологическому параметру, характеризующему условия работ.

В случае если время физического износа у сравниваемой детали меньше, чем у детали ведущего звена, то для этой детали назначается кратное количество замен, если больше – подбирают коэффициент приведения, уменьшающий физический износ детали.

Последующие расчеты проводятся путем перебора – поочередного присвоения всем деталям блока технической системы физической стойкости произвольно выбранной детали, назначенной в качестве ведущего звена блока технической системы. Перебрав все возможные варианты, определяют нужный диапазон кратности работы ведущего звена блока, по которому выстраивают значения кратности отдельно взятых деталей в соответствии с коэффициентами приведения. В итоге сравнительным анализом полученных результатов выбирают ведущую кратность работы рассматриваемого функционального блока технической системы.

Оптимизация материальных затрат на производство и эксплуатацию функционального блока технической системы проводится путем выявления минимальных затрат для каждой детали с учетом наименьшей кратности, что выражается суммой минимальных значений. В связи с тем, что в каждом функциональном блоке технической системы имеют место детали с различной приведенной кратностью работы, то к сумме затрат на их изготовление присоединяются затраты на замену и ремонт этих деталей, а также затраты на остановки блоков и простои технической системы в целом. В результате оптимизации сравниваются и выбираются наиболее рентабельные варианты по наименьшей сумме затрат за период морального износа технической системы.

В модели затрат на изготовление изделий в качестве аргумента выступает эксплуатационная стойкость, которая, в свою очередь, может являться функцией технологических параметров:

$$N = N_i(A),$$

где N_i – износ i -й детали, эксплуатационный параметр; A – эксплуатационные технологические параметры (свойства) изделия.

От истории изготовления детали зависит ее физико-механическое состояние на момент начала эксплуатации. Количественными характеристиками та-

кого состояния могут выступать: величина накопленной деформации [13, 14], вид деформации [10], показатель упрочнения, наличие механической и термической обработки и т.д.

В работе [15] проиллюстрирована качественная оценка соотношения затрат и долговечности работы деталей технической системы.

Примем за Z затраты на изготовление технической системы, тогда в частном случае

$$Z = Z_i (N_i),$$

где Z_i – затраты на производство одной i -й детали.

Для повышения долговечности работы деталей наиболее рационально осуществлять переход от одного вида материала к другому, более качественному, чем повышать долговечность уже используемого материала путем увеличения дополнительных затрат технологическими нововведениями:

$$\Delta Z_i = Z_0 \cdot (e^{K_i t} - 1),$$

где Z_0 – исходные материальные затраты на производство детали; ΔZ_i – дополнительные затраты технологических нововведений; $e^{K_i t}$ – натуральный логарифм коэффициента K_i , коэффициента соответствия, характеризующего эксплуатационный износ произвольно выбранной i -й детали за полный период времени функционирования технической системы.

Поскольку в процессе эксплуатации детали состояние материала изменяется, то для упрощения схемы расчета предложено линеализовать диаграммы изменения эксплуатационной стойкости деталей, выраженных через диаграммы состояний (например, накопленной деформации, циклической усталости, суммирования микрповреждений и т.д.), что позволило определить эксплуатационный износ углом наклона траектории линеализованных диаграмм (рис. 2).

Таким образом, для деталей одной группы функционального назначения (работающих в условиях идентичных наложений механических нагрузений) скорость эксплуатационного износа зависит от марки материала деталей и вида технологической обработки [3, 7].

Затраты на изготовление и эксплуатацию детали можно рассматривать с позиции пределов верхнего и нижнего уровня затрат.

Расчет верхнего уровня затрат. Затраты на понижение эксплуатационной стойкости детали (Z').

Примем, что эксплуатационная стойкость детали № 1 превышает расчетную стойкость детали № 2 на величину f_i (см. рис. 2 [12]).

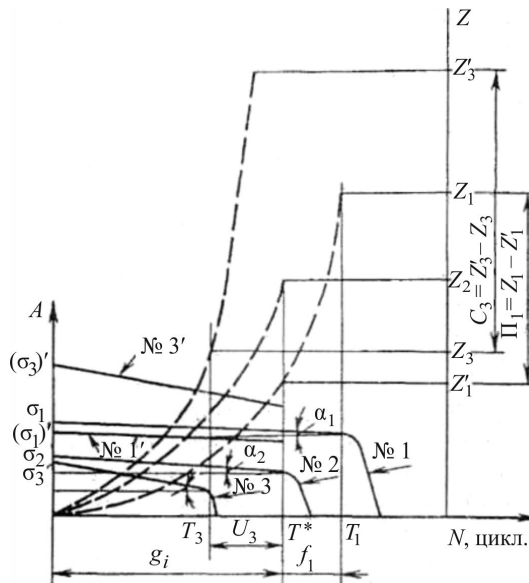


Рис. 2. Экспериментальные зависимости технологических, эксплуатационных параметров и экономических показателей: T^* – номинальная долговечность работы технической системы; g_i – допустимая долговечность работы i -й детали; i – номер детали, $i = 1, 2, 3$; f_1 – резерв надежности детали № 1; U_3 – величина эксплуатационной стойкости детали № 3, недостающей до требуемой t^* ; Z_i – затраты на изготовление i -й детали; $A(\sigma_i)$ – технологические параметры деталей № 1, 2, 3, выполненных из различных материалов; α_i – угол наклона прямой, характеризующий скорость технологического износа материала i -й детали; $C_3 = Z'_3 - Z_3$ – величина дополнительных затрат, необходимых для повышения долговечности работы детали № 3

Исходя из теоретических и практических исследований, данная зависимость величины дополнительных затрат от эксплуатационной стойкости носит линейный характер и может быть выражена уравнением

$$Z'_i = K_N \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где K_N – коэффициент соответствия, предусматривающий изменение затрат от снижения долговечности работы детали (например, детали № 1), реализуемые за счет изменения технологии ее получения; $\Delta t = f_i$ – резерв эксплуатационной стойкости; $\Delta t = t_i - t^*$ – для детали № 1; $Z'_i = \Delta Z' + Z_i$ – для детали № 1; где $\Delta Z' = \Pi_i$, а $Z_i = Z_0$ – исходные затраты на рассматриваемую деталь № 1.

В общем виде затраты на деталь при уменьшении базовой стойкости i -й детали составят:

$$Z'_i = Z_0 - K_N \cdot f_i \quad (4)$$

или

$$K_N \cdot f_i = \Pi_i, \quad (5)$$

где Z'_i – фактические затраты на изготовление i -й детали (стойкость материала, технологические переделы, овеществленный труд и т.д.).

Долговечность детали № 1 превышает требуемый уровень эксплуатационной стойкости. Указанные в формуле (5) затраты можно уменьшить, применив менее качественные материалы (при этом расширяется номенклатура используемого материала) либо повысив коэффициент автоматизации на технологических операциях изготовления детали, улучшив культуру производства или другим способом, включая упрощение технологии и оптимизацию режимов обработки.

Установлено [16], что увеличение затрат от изменения технологических параметров носит нелинейный характер [7] и может быть представлено в виде

$$Z = Z \cdot e^{K_\sigma \cdot [\sigma - (\sigma)']}, \quad (6)$$

где K_σ – коэффициент соответствия затрат и технологических параметров; σ – эксплуатационные параметры детали, изготовленной по исходной технологии; $(\sigma_1)'$ – эксплуатационные параметры детали после ее изготовления по новой технологии.

Очевидно, что абсолютное значение положительно и $\left| K_\sigma \cdot [\sigma - (\sigma)'] \right| < \infty$.

Известно, что показательную функцию можно разложить в ряд

$$e^{K_\sigma \cdot [\sigma - (\sigma)']} = 1 + \frac{K_\sigma \cdot [\sigma - (\sigma)']}{1!} + \frac{\left\{ K_\sigma \cdot [\sigma - (\sigma)'] \right\}^2}{2!} + \frac{\left\{ K_\sigma \cdot [\sigma - (\sigma)'] \right\}^3}{3!} + \dots$$

Из практики установлено, что для удобства расчета рассмотренную выше функциональную зависимость можно представить в виде

$$Z - Z' = K_\sigma \cdot [\sigma - (\sigma)']. \quad (7)$$

Коэффициент K_σ может вычисляться конкретно для каждого отдельно взятого материала детали, и он показывает, как изменяются затраты от изменения качества детали.

Исследование уравнений (6) и (7) показало, что можно провести подобную замену, если значение $K_\sigma \cdot [\sigma - (\sigma)'] < 0,45$, что соответствует относительной ошибке по формуле (7) для Z_1 не более 10 %.

Таким образом, указанный выше способ уменьшения затрат эквивалентен уменьшению затрат по технологическому признаку.

В настоящее время нет банка данных, позволяющего отразить зависимость (6). Однако существуют разработки [3], показывающие однозначную зависимость эксплуатационных параметров от технологических.

Исследованы экспериментальные зависимости повышения долговечности работы деталей от различных технологических факторов [11], анализ которых позволил сделать вывод о возможности использования соотношения

$$(t_1 - t^*) = K_T \cdot [\sigma_1 - (\sigma_1)'], \quad (8)$$

при $t_1 = t^*$, $(\sigma_1)' < \sigma_1$,

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - (\sigma_1)'$$

В общем виде при $t_1 > t^*$,

$$t_1 = t^* + K_T \cdot \Delta\sigma, \quad (9)$$

где $K_T = \operatorname{tg}\alpha$ – угол наклона кривой «усталости», который выбирается из экспериментальных или исследовательских данных индивидуально для каждого вида материалов.

Коэффициент долговечности K_T выводится из уравнения (9):

$$K_T = \frac{(t_1 - t^*)}{\sigma_1 - (\sigma_1)'} \quad (10)$$

Используя экспериментальные данные, представленные на рис. 2 [15], и из подобия треугольников определяем следующую зависимость:

$$(\sigma_1)' = \frac{\sigma_1}{1 + f} \quad (11)$$

Значение коэффициента K_N определяется из совместного решения уравнений (5), (6), (8) и (11):

$$\begin{cases} Z_1 - (Z_1)' = K_N \cdot [t_1 - t^*]; \\ Z_1 - (Z_1)' = K_\sigma \cdot [\sigma_1 - (\sigma_1)']; \\ (t_1 - t^*) = K_T \cdot [\sigma_1 - (\sigma_1)']; \\ (\sigma_1)' \cdot (t_1 - t^*) = [\sigma_1 - (\sigma_1)']. \end{cases} \quad (12)$$

Откуда

$$K_N = \frac{K_\sigma}{K_T}. \quad (13)$$

В рамках принятых допущений получилось наглядное соотношение между коэффициентами K_N , K_T , K_σ . По практическому смыслу значения этих коэффициентов больше нуля. Таким образом, коэффициент соответствия затрат от снижения долговечности работы детали K_N прямо пропорционален затратам от технологии K_σ и обратно пропорционален долговечности работы детали K_T .

С другой стороны, из уравнения (13) очевидно, что коэффициент соответствия затрат от технологических параметров K_σ может быть представлен произведением коэффициентов соответствия изменения технологических параметров и затрат от снижения долговечности работы детали [17].

Графическое построение в трехмерном пространстве уравнения

$$K_\sigma = K_N \cdot K_T \quad (14)$$

примем в качестве осей координат K_N , K_T , K_σ , при $K_N > 0$, $K_T > 0$, $K_\sigma > 0$, полученная поверхность представляет собой поверхность гиперболического параболоида, который в этой части координат не имеет особых точек в виде максимума и минимума.

Из системы уравнений (12) также следует, что

$$K_T \cdot \frac{K_N}{K_\sigma} = \text{const}. \quad (15)$$

Уравнение (15) назовем критерием «Универсальное экономическое соотношение» причинно-следственной связи технологических, эксплуатационных параметров и экономических показателей [15].

Полученная зависимость позволяет в дальнейшем при экономическом анализе технических систем пользоваться только технологическими и временными зависимостями отдельных деталей, составляющих техническую систему.

Из исследовательских источников [18–20] и производственных исследований выявлено, что для каждого класса материалов с учетом их функционального назначения коэффициент долговечности K_T является величиной постоянной и отражает вид технологической обработки,

$$K_T = \text{const}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что для выявления оптимальных затрат на изготовление деталей, принадлежащих известной технической сис-

теме, рассчитанной на менее длительный срок службы, чем это позволяют эксплуатационные характеристики деталей, необходимо составить банк данных статистического анализа технологических и эксплуатационных характеристик во взаимосвязи с экономическими показателями [21], в том числе коэффициентами соответствия K_N , K_T , K_σ .

Расчет нижнего уровня затрат. Затраты на повышение эксплуатационной стойкости детали (Z'').

Примем, что эксплуатационная стойкость детали № 3 (см. рис. 2 [15]) меньше расчетной стойкости детали № 2 на величину g -кривая № 3.

Исходя из общих закономерностей создания новых материалов, опирающихся на анализ производственных затрат в отрасли энергетического машиностроения, приведенная ниже зависимость величины дополнительных затрат от усложнения технологической обработки носит экспоненциальный характер:

$$\Delta Z'' = Z_0 \cdot (e^{K_z \cdot t} - 1), \quad (16)$$

где K_z – коэффициент соответствия, характеризующий изменения затрат на увеличение качества материала за счет вложения дополнительных материальных расходов на научно-технические исследования, совершенствование и усложнение технологических переделов.

$$\Delta Z'' = Z'_3 - Z_3 = C_3. \quad (17)$$

Известно, что эксплуатационная стойкость детали № 3 не соответствует заданной долговечности работы технической системы, ее моральному износу t^* . Чтобы поднять долговечность детали до заданного уровня эксплуатационных свойств t_3 , необходимо увеличить срок ее службы на величину U_3 . При этом дополнительные затраты по (16) составят:

$$Z'_3 - Z_3 = Z_3 \cdot (e^{K_z(t^* - t_3)} - 1),$$

где t^* – заданное моральное время износа (стойкости) работы детали.

После преобразования (17) получим общие затраты для детали № 3 (см. рис. 2 [15]):

$$Z'_3 = Z_3 \cdot e^{K_z(t^* - t_3)}, \quad (18)$$

где $t^* \geq t_3$.

Аналогично (8) для детали № 3 (см. рис. 2 [6]) выразим зависимость эксплуатационных параметров от технологических:

$$K_T \cdot [(\sigma_3)' - \sigma_3] = (t^* - t_3), \quad (19)$$

где $(\sigma_3)' \geq \sigma_3$.

Выразим дополнительные затраты от повышения технологических свойств:

$$Z'_3 - Z_3 = Z_3 \cdot \left(e^{K_0[(\sigma_3)' - \sigma_3]} - 1 \right), \quad (20)$$

где K_0 – коэффициент соответствия, предусматривающий изменение затрат от повышения долговечности работы детали,

$$Z'_3 = Z_3 \cdot e^{K_0[(\sigma_3)' - \sigma_3]}. \quad (21)$$

По аналогии (12) составим систему уравнений, проводя предварительно преобразование коэффициентов K_0 и K_Z , в логарифмической форме:

$$\begin{cases} \ln Z'_3 = \ln Z_3 + K_Z \cdot (t^* - t_3); \\ \ln Z'_3 = \ln Z_3 + K_0 \cdot [(\sigma_3)' - \sigma_3]; \\ (t^* - t_3) = K_T \cdot [(\sigma_3)' - \sigma_3]. \end{cases} \quad (22)$$

Разделим первое уравнение на второе, а из третьего выразим коэффициент K_T :

$$1 = \frac{K_Z \cdot (t^* - t_3)}{K_0 \cdot [(\sigma_3)' - \sigma_3]}, \quad K_T = \frac{(t^* - t_3)}{[(\sigma_3)' - \sigma_3]},$$

откуда получим соотношение, аналогичное (15):

$$K_T \cdot \frac{K_Z}{K_0} = 1. \quad (23)$$

Затраты на деталь при увеличении базовой стойкости детали составят:

$$Z_1 = Z_0 + C_i, \quad (24)$$

где $C_i = Z_0 \cdot (e^{K_Z \cdot U_i} - 1)$ – величина дополнительных затрат на повышение качества детали; U_i – величина эксплуатационной стойкости, недостающей до заданного ресурса работы технической системы, при $t^* > t_i$

$$U_i = t^* - t_i.$$

Из рассмотренных выше двух версий (верхний и нижний расчеты) следует, что оптимальные затраты на изготовление детали определяют путем моде-

лирования экономических параметров, включающих долговечность, технологические показатели. Таким образом, величина дополнительных затрат на производство и эксплуатацию изделий может быть определена с двух сторон:

- «сверху» – путем учета изменения величин технологических параметров (А) с σ_{\max} до σ_{\min} и соответствующих им затратам (Z);

- «снизу» – варьированием эксплуатационного параметра (g) от t до t^* в увязке с общими затратами.

В указанных случаях для K_T , K_Z и K_N , K_0 затраты выражают одинаковую величину. Для экономических расчетов при манипулировании такими параметрами, как долговечность и затраты, наиболее приемлемой является расчет целесообразности затрат «снизу».

В случае экономической целесообразности [22] замены одной дорогостоящей детали на несколько деталей с более низкой эксплуатационной стойкостью вступает в силу равенство между коэффициентами соответствия $K_0 \cong K_\sigma$ и параметром роста затрат от повышения уровня технологических свойств K_T ,

$$K_T = K_0 = K_\sigma, \quad K_Z = K_N.$$

Помимо затрат на Π_i и C_i в экономических расчетах технической системы следует учитывать и затраты на замену деталей – Z_3 . Величина затрат для замены изношенной детали на новую в процессе эксплуатации технической системы может быть выражена частью затрат, приходящихся на изготовление одной детали.

Затраты на замену детали представлены в виде уравнения

$$Z_3 = r \cdot Z_d^1 \cdot (n-1), \quad (25)$$

где r – константа.

Из анализа опыта промышленного освоения новых разработок известно, что изменение затрат при повышении стойкости деталей не носит линейный характер. Если принять затраты на изготовление одной детали за единицу $Z_d^1 = 1$, по стойкости, удовлетворяющей время морального износа t^* , то затраты на детали более низкого качества, имеющие кратность работы больше единицы $J_i > 1$, можно представить нелинейной зависимостью.

Пусть

$$\frac{Z_d^i}{Z_d^1} = \left(\frac{1}{n} \right)^k, \quad (26)$$

где n – количество деталей.

Параметр k характеризует степень роста затрат на получение детали от роста уровня технологических свойств. Следует отметить, что согласно общепринятым представлениям $k > 1$.

Для работы технической системы требуется деталь с заданным сроком службы. С помощью банка данных выбираются и сравниваются следующие возможные варианты:

- 1) используется одна деталь (высокопрочная);
- 2) используются две детали (среднего качества);
- 3) используются три или большее количество деталей (низкого качества).

Для количественного сопоставления описанных вариантов введем обозначения:

Z_g^1 – затраты на изготовление деталей по i -му варианту;

Z_3 – затраты на замену детали.

Общие затраты Z_0 по трем разным вариантам выражаются формулой

$$Z_0 = Z_d^i + Z_3 = \left(\frac{1}{n}\right)^k \cdot Z_d^i + (n-1) \cdot Z_d^i \cdot r \quad (27)$$

или

$$Z_0 = Z_d^i \cdot \left[\left(\frac{1}{n}\right)^k + r \cdot (n-1) \right]. \quad (28)$$

При заданных значениях k и r (информация из банка данных) общие затраты могут быть оптимизированы по количеству используемых деталей. Для этого найдем функции (27):

$$\frac{dZ_0}{dn} = -k \cdot \left(\frac{1}{n}\right)^{k+1} \cdot Z_d^i + r \cdot Z_d^i. \quad (29)$$

Из соотношения (26) следует, что оптимальное значение

$$n_{\text{опт}} = \left(\frac{k}{r}\right)^{\frac{1}{k+1}}, \quad (30)$$

отсюда следует, что при крайне высоких затратах на смену детали

$$(r \gg k), \quad n_{\text{опт}} < 1.$$

Естественно, в этом случае принимается вариант одной детали: $n = 1$.

Если замена детали не требует больших затрат, то количество деталей больше единицы: $n_{\text{опт}} > 1$.

После вычисления значения $n_{\text{опт}}$ по (30) следует округлить полученное значение до ближайшего целого.

Возвращаясь к версии расчета затрат на повышение эксплуатационной стойкости детали (расчет нижнего уровня затрат, кривая № 3 рис. 2), можно сделать вывод, что в зависимости (7) коэффициент соответствия K_{σ} зависит от закладываемого времени работы детали. Чем меньше количество задействованных сменных деталей, тем больше k в (21). Поэтому для получения объективной экономической величины коэффициента K_{θ} (21) можно воспользоваться методикой замены одной детали на несколько менее долговечных, считая, что материальные затраты на установку и замену детали пренебрежительно малы и не превышают значения, равного $0,01 \cdot Z_i \cdot r$.

Подводя итог теоретических и экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что для построения модели оценки экономической целесообразности выбора того или иного вида технологической обработки для данного класса материалов можно воспользоваться коэффициентами соответствия и известным набором долговечности деталей.

В дальнейшем будем использовать коэффициенты K_T , K_Z и K_N , при этом надо иметь в виду равенства

$$K_T \sim K_{\theta} \sim K_{\sigma}, \quad K_Z \sim K_N.$$

При расчете затрат, учитывающих уменьшение базовой стойкости i -й детали (расчет верхнего уровня затрат), используется формула (5).

При расчете затрат, учитывающих увеличение базовой стойкости i -й детали (расчет нижнего уровня затрат), используется формула (24).

Предложенная методика расчета задумана как вспомогательный инструмент анализа экономической оценки технической системы. Методика предусматривает выделение из множества допустимых наборов деятельности объекта рационального или оптимального, т.е. является оптимизационной. Как правило, деятельность технической системы оценивается с помощью нескольких экономических показателей, отсюда векторный или многокритериальный характер методики.

В отличие от однокритериальных оптимизационных моделей настоящая методика позволяет оптимизировать несколько критериев одновременно. Вместе с тем наличие различных критериев делает задачу выбора оптимального варианта не столь определенной, как в однокритериальном случае, и предполагает совмещение процессов решения и моделирования, предусмотрена возможность изменения критериев и ограничений.

Новый методический подход позволяет прогнозировать оптимальные материальные затраты на производство изделий и эксплуатацию, определять пути рационализации технологических процессов изготовления изделий из новых конструкционных материалов.

Во второй части работы будет предложен универсальный экономический критерий, связывающий технологические и эксплуатационные параметры с экономическими показателями, отражающий целесообразность затрат на изготовление и эксплуатацию технической системы во временных параметрах ее жизнеобеспечения. Представлена модель для экономического анализа и оценки применения конструкционных материалов.

Выводы. Показана необходимость комплексного учета взаимозаменяемости деталей, входящих в техническую систему, для экономической оценки создания и применения конструкционных материалов и деталей из них. Предложены уравнения, позволяющие моделировать предельную кратность работы детали и затраты на изготовление и эксплуатацию деталей, работающих с заданной величиной кратности. Предложена методика определения ожидаемых затрат по верхнему и нижнему пределам с учетом кратности работы деталей, минимальных затрат на ремонт и замену. Построены таблицы и номограммы затрат при различных кратностях ремонта деталей.

Список литературы

1. Васильев Г.А. Планирование повышении экономической эффективности машиностроительного производства. – М.: Машиностроение, 1985. – 207 с.
2. Голосовский С.И., Никитин А.П., Тутов И.Е. Техничко-экономическая эффективность применения перлитных сталей в энергомашиностроении // Экономическая эффективность внедрения новых технологических процессов и конструкционных материалов в тяжелом машиностроении / ЦБТИ. – М., 1961. – С. 93–97.
3. Повышение долговечности автомобильных металлических материалов / Г.П. Гуслякова, С.И. Жбанников [и др.]. – Нижний Новгород, 1991. – 64 с.
4. Ласковский А.А. Методические рекомендации по комплексной оценке эффективности машиностроительного производства в НПО. – Киев: Наукова думка, 1982. – 121 с.
5. Методические положения по выбору параметров, наиболее полно характеризующих потребительские качества продукции и связанные с затратами материальных и топливо-энергетических ресурсов / Госплан СССР, НИИПиН. – М., 1981. – 32 с.
6. Sopisal V., Csak J. Results and trends of development in extrusion equipment and technologies // V Jugosiovanski madenarodui Simposis o dumiriiga. – Sjnblgans, 1982. – P. 376–389.
7. Маленковнч В.Б., Кужель А.Е. Исследование взаимосвязи эксплуатационных параметров новых конструкционных материалов с экономическими показателями // Синергетика. Новые технологии получения и свойства металлических материалов: материалы 2 Всесоюз. симп. / Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова. – М., 1991. – 176 с.

8. Вайцехович С.М. Исследование процессов прессования и разработка оборудования для многоэтапного деформирования порошковых материалов: дис. ... канд. техн. наук / ЦНИИТмаш. – М., 1990. – 268 с.

9. Тензорно-нелинейная модель разрушения деформируемых материалов Мишулина–Михалевица / С.М. Вайцехович, В.М. Михалевич, А.В. Бараев, Г.Г. Кривенко А.А. Красуля. – М.: Технология машиностроения, 2016. – № 10. – С. 18–25.

10. Гурей И.В. Повышение эффективности фрикционного упрочнения стали с помощью технологических сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львов, 1989. – 18 с.

11. Гусякова Г.П. Пластическая обработка металлов и сварных соединений с целью повышения долговечности изделий / ВСНТО. – Горький, 1987. – 52 с.

12. Маленкович В.Б., Кужель А.Е. Новые методы оценки эффективности технологических процессов в машиностроении // Технология, экономика, организация производства и управления: экспресс-информ. / ЦНИИТмаш. – М., 1991. – 18-1-91-03. – С. 1–7.

13. Вайцехович С.М., Михалевич В.М., Краевский В.А. Теория и технология получения изделий методами СВС-баротермии на основе моделирования процессов накопления повреждений // Порошковая металлургия. – 2013. – № 1/2. – С. 3–10.

14. Вайцехович С.М., Михалевич В.М., Краевский В.А. Технология изготовления твердосплавных режущих пластин методом СВС-баротермии // Порошковая металлургия. – 2013. – № 3/4. – С. 20–26.

15. Вайцехович С.М., Кужель А.Е. Комплексная система оценки применения конструкционных материалов в промышленности // Вестник машиностроения. – 1997. – № 4. – С. 29–32.

16. Методика разработки нормативов удельной металлоемкости на единицу технического параметра оборудования по важнейшим видам продукции машиностроения / ГКНТ СССР. – М., 1981. – 28 с.

17. Похмурский В.И. Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения. – Киев: Наукова думка, 1974. – 186 с.

18. Назаренко Г.Т. Усталостная прочность предварительно растянутой стали в коррозионной среде // Физико-химическая механика материалов. – 1968. – Т. 4, № 1. – С. 94–96.

19. Соколов Л.Д., Гусякова Г.П., Пряхин В.А. Расчеты деталей металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.

20. Циклическая деформация и усталость металлов. – Т. 1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов / под ред. В.Г. Трощенко. – Киев: Наукова думка, 1985. – 216 с.

21. Поведение потребителей: учеб. / под ред. Л.С. Драганчука.– М.: ИНФРА-М, 2017. – 192 с.

22. Поведение потребителей / И.М. Синяева, Г.А. Васильев, С.В. Земляк, Л.А. Ибрагимов [и др.]; КОПР. – М., 2007. – 292 с.

References

1. Vasil'ev G.A. Planirovanie povyshenii ekonomicheskoi effektivnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva [Planning for increasing the economic efficiency of machine-building production]. Moscow, Mashinostroenie, 1985, 207 p.

2. Golosovskii S.I., Nikitin A.P., Tutov I.E. Tekhniko-ekonomicheskaiia effektivnost' primeneniia perlitnykh stalei v energomashinostroenii [Feasibility of using perlitic steel in power plant engineering]. *Ekonomicheskaiia effektivnost' vnedreniia novykh tekhnologicheskikh protsessov i konstruktsionnykh materialov v tiazhelom mashinostroenii*. Moscow, TsBTI, 1961, pp. 93–97.

3. Gusliakova G.P., Zhbannikov S.I. [et al.]. Povyshenie dolgovechnosti avtomobil'nykh metallicheskih materialov [Improving the durability of automobile metal materials]. Nizhny Novgorod, 1991, 64 p.

4. Laskovyi A.A. Metodicheskie rekomendatsii po kompleksnoi otsenke effektivnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva v NPO [Methodological recommendations for integrated assessment of the efficiency of machine-building production in a scientific-and-production association]. Kyiv, Naukova dumka, 1982, 121 p.

5. Metodicheskie polozheniia po vyboru parametrov, naibolee polno kharakterizuiushchikh potrebitel'skie kachestva produktsii i svyazannye s zatratami material'nykh i toplivo-energeticheskikh resursov [Guidelines for the selection of parameters that characterize consumer product quality and are associated with the cost of material and fuel-and-energy resources]. Moscow, Gosplan SSSR, NIIPiN, 1981, 32 p.

6. Sopisal V., Csak J. Results and trends of development in extrusion equipment and technologies. *V Jugosiovanski madenarodui Simposis o dumiriiga*. Sjnblgans, 1982, pp. 376–389.

7. Malenkovnch V.B., Kuzhel' A.E. Issledovanie vzaimosviasi ekspluatatsionnykh parametrov novykh konstruktsionnykh materialov s ekonomicheskimi pokazateliami [Study of the relationship of the operational parameters of new structural materials with economic indicators]. *Sinergetika. Novye tekhnologii polucheniia i svoistva metallicheskih materialov*. Proceedings of the 2nd All-Union Symposium, Moscow, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, 1991, 176 p.

8. Vaitsekhovich S.M. Issledovanie protsessov pressovaniia i razrabotka oborudovaniia dlia mnogoetapnogo deformirovaniia poroshkovykh materialov [Research of pressing processes and development of equipment for multi-stage deformation of powder materials]. Ph.D. thesis. Moscow, TSNIIMASH., 1990, 268 p.

9. Vaitsekhovich S.M., Mikhalevich V.M., Baraev A.V., Krivenko G.G., Krasulia A.A. Tenzorno-nelineinaia model' razrusheniia deformiruemykh materialov Mishulina–Mikhalevicha [Tensor-nonlinear model of fracture of deformable materials of Mishulin–Mikhalevich]. Moscow, Tekhnologiiia Mashinostroeniia, vol. 10, pp. 18–25.

10. Gurei I.V. Povyshenie effektivnosti friktsionnogo uprochneniia stali s pomoshch'iu tekhnologicheskikh sred [Improving the efficiency of steel friction hardening using technological environment]. Abstract of Ph.D. Thesis. Lviv, 1989, 18 p.

11. Gusliakova G.P. Plasticheskaia obrabotka metallov i svarykh soedinenii s tsel'iu povysheniia dolgovechnosti izdelii [Plastic processing of metals and welded joints in order to increase the durability of products]. Gorky, VSNTO, 1987, 52 p.

12. Malenkovich V.B., Kuzhel' A.E. Novye metody otsenki effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii [New methods for evaluating the effectiveness of technological processes in machine-building production]. *Tekhnologiya, ekonomika, organizatsiia proizvodstva i upravleniia: Ekspresinform*. Moscow, TSNIIMASH, 1991, 18-1-91-03, pp. 1–7.

13. Vaitsekhovich S.M., Mikhalevich V.M., Kraevskii V.A. Teoriia i tekhnologiya polucheniia izdelii metodami SVS-barotermii na osnove modelirovaniia protsessov nakopleniia povrezhdenii [Theory and technology of barothermal self-propagating high-temperature synthesis based on damage accumulation modeling]. *Poroshkovaia metallurgiya*, 2013, no. 1/2, pp. 3–10.

14. Vaitsekhovich S.M., Mikhalevich V.M., Kraevskii V.A. Tekhnologiya izgotovleniia tverdospлавnykh rezhushchikh plastin metodom SVS-barotermii [Manufacture of hardmetal cutting plates using barothermal self-propagating high-temperature synthesis]. *Poroshkovaia metallurgiya*, 2013, no. 3/4, pp. 20–26.

15. Vaitsekhovich S.M., Kuzhel' A.E. Kompleksnaia sistema otsenki primeneniia konstruktsionnykh materialov v promyshlennosti [The complex evaluation system of construction materials application in industrial production]. *Vestnik mashinostroeniia*, 1997, no. 4, pp. 29–32.

16. Metodika razrabotki normativov udel'noi metalloemkosti na edinitsu tekhnicheskogo parametra oborudovaniia po vazhneishim vidam produktsii mashinostroeniia [Methodology for the development of standards for specific metal consumption per unit of technical parameter of equipment for the most important types of engineering products]. *USSR State committee for science and technology*. Moscow, 1981, 28 p.

17. Pokhmurskii V.I. Korroziionno-ustalostnaia prochnost' stali i metody ee povysheniia [Corrosion fatigue strength of steel and methods for increasing it]. Kyiv, Naukova dumka. 1974, 186 p.

18. Nazarenko G.T. Ustalostnaia prochnost' predvaritel'no rastianutoi stali v korroziionnoi srede [Fatigue strength of pre-stretched steel in a corrosive environment]. *Fiziko-khimicheskaiia mekhanika materialov*, 1968, vol. 4, no. 1, pp. 94–96.

19. Sokolov L.D., Gusliakova G.P., Priakhin V.A. Raschety detalei metallurgicheskogo oborudovaniia [Calculations of parts of metallurgical equipment]. Moscow, Metallurgiya, 1983, 176 p.

20. Tsiklicheskaia deformatsiia i ustalost' metallov [Cyclic deformation and metals fatigue]. *Vol. 1. Malotsiklovaia i mnogotsiklovaia ustalost' metallov*. Ed. V.G. Troshchenko. Kyiv, Naukova dumka, 1985, 216 p.

21. Povedenie potrebitelei [Consumer behaviour]. Ed. L.S. Draganchuk. Moscow, INFRA-M, 2017, 192 p.

22. Siniaeva I.M., Vasil'ev G.A., Zemliak S.V., Ibragimov L.A. [et al.] Povedenie potrebitelei [Consumer behaviour]. Moscow, 2007, 292 p.

Оригинальность 99 %

Получено 10.12.2019 Принято 10.01.2020 Опубликовано 29.06.2020

S.M. Vaytsekhovich, Yu.V. Vlasov

**COMPREHENSIVE ASSESSMENT
OF PRODUCTION EFFICIENCY AND PRODUCT CONSUMPTION
IN MACHINE BUILDING INDUSTRY**

The study offers a criterion for comprehensive economic assessment of working and operation objects united in a technical system to estimate engineering processes and application of constructional materials and parts made of them. A need for comprehensive stock-taking of interchangeable parts included in the technical system is shown. The authors discuss the ways of optimizing technological processes, dependences between economic indicators, process and technical parameters of products. Interchangeable parts subject to stock-taking serve the basis for an economic assessment of engineering and application of constructional materials and related parts. The paper contains mathematical expressions allowing calculating the maximum parts work ratio, expenses nomograms at various repair ratios, manufacturing and operation costs. The authors have designed a method to determine the expected costs by upper and lower limits, taking into account the parts work ratio, repair costs and their complete replacement. The method is based on the comparison of the assessment criteria reflecting technical and economic indicators of alternative technologies and materials by revealing the rational costs of individual parts manufacturing and operation allowing for the additional costs of their replacement and repair ratio.

Tables and nomograms of costs for various frequencies of parts repair are constructed. A general economic criterion has been developed that permits to base an economic analysis of the technical system only on the technological and operational indicators included in the technical system. The general criterion was obtained by generalizing theoretical and experimental research in the fields of technology, economics and materials science, serving the main branches of mechanical engineering. A software suite has been developed to optimize the number of parts to be repaired at a given work and repair frequency and minimum expenses, as well as the number of the parts produced.

Keywords: technical system, subassembly, ratio of component lifetime, master unit, tool wear resistance, operating parameters, assessment criteria, performance reliability, durability, obsolescence.

Sergey M. Vaytsekhovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher, Technomash Scientific and Production Association, e-mail: ask-mlad@mail.ru.

Yury V. Vlasov – Candidate of Technical Sciences, General Director, Technomash Scientific and Production Association, e-mail: info@tmnp.ru.

Received 10.12.2019 Accepted 10.01.2020 Published 29.06.2020