МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА

УДК 330.322.2:621.003.1:678.027

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КАЧЕСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

О.В. АВДЕЙЧИК, канд. техн. наук В.И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф. В.А. СТРУК
(Гродненский государственный университет им. Янки Купоны),
канд. техн. наук Г.А. КОСТЮКОВИЧ
(ОАО «Белкард», г. Гродно)

Проведен анализ конструкторско-технологических и материаловедческих аспектов создания и эксплуатации машиностроительных изделий различного функционального назначения, свидетельствующий о зависимости между суммарными затратами и требованиями технических условий. Рассмотрена эффективность использования материалов, технологий в конструкциях изделий с точки зрения оптимального соотношения суммарных затрат и установленного ресурса при гарантированном выполнении требований надежности.

Актуальными проблемами современного машиностроения является повышение качества и надежности при оптимальном потреблении различного рода ресурсов. Критерии качества содержат показатели, определяющие потребительские свойства продукции, которые оговариваются нормативной документацией [1]. Ряд скрытых показателей качества могут проявиться в ходе эксплуатации изделия конкретного функционального назначения и обеспечить дополнительные потребительские преимущества, например, увеличение срока сохранения гарантированных технической документацией характеристик. Любые изделия используют по назначению в течение некоторого периода времени. В нем под действием различных факторов наблюдается изменение их характеристик, которые обусловливают заданные критерии качества. Сохранение заданных показателей качества в течение оговоренного периода использования изделия определяет понятие «надежность» [2]. К различным изделиям, выполняющим заданные функции, предъявляют различные требования по надежности. Например, основными требованиями к транспортным и сельскохозяйственным машинам являются безопасность движения, грузоподъемность, скорость передвижения, эргономичность, удельный расход горюче-смазочных материалов, производительность [3, 4]. Любое изделие, выполняя определенные функции, теряет свои потребительские характеристики вследствие абсолютного и относительного изменения показателей качества, обусловленного процессами старения и появлением более совершенных по конструкторско-технологическим решениям и применяемым материалам изделий. В связи с этим вводят понятие «работоспособность» - состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значение заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией [2]. Одной из характеристик работоспособности является установленный ресурс (срок службы) $С_{ур}$, который определяет период работы всего изделия до предельного состояния с учетом требований безопасности и экономической эффективности. Этот показатель определяется прежде всего конструкторско-технологическими и материаловедческими аспектами. Однако выбор конкретных материалов и технологий при изготовлении инновационного изделия должен базироваться на экономической целесообразности. Поэтому необходимы критерии оценки экономической целесообразности применяемых инновационных решений при создании изделий конкретного функционального назначения.

Объектами исследований являются изделия, применяемые для комплектования автомобилей, железнодорожных вагонов, сельскохозяйственной техники - карданные передачи [6], амортизаторы и тормозные камеры [7]. Выбор объектов обусловлен существенным различием критериев качества, обеспечивающих их надежность в конструкциях различных транспортных средств и сельскохозяйственных агрегатов. Подобными изделиями оснащено большинство современных конструкций грузовых и легковых автомобилей, тракторов, трамваев, троллейбусов и сельскохозяйственной техники. Годовое производство различных конструкций карданных передач на ОАО «Белкард» составляет свыше 1 млн. шт., а амортизаторов и тормозных камер на ОАО «Гродненский завод автомобильных агрегатов» - свыше 2,5 млн. шт.

Результаты исследований. Выбор конструкторско-технологических решений и материалов для изготовления изделий машиностроения определяется на основе системного анализа всех аспектов его эксплуатации. Рассмотрим принципиальные направления разработки инновационных изделий в машиностроении.

Сохранение показателей качества и надежности машиностроительного изделия в течение неопределенного времени принципиально невозможно, так как даже при использовании уникальных материалов и технологий, обеспечивающих его практически неограниченный установленный ресурс, происходит относительное изменение качества вследствие появления более совершенных моделей и повышающихся требований к эргономичности, безопасности и экологичности эксплуатации. Техническая надежность

изделия тесно связана с затратами на их изготовление, эксплуатацию и рециклинг в соответствии с «петлей качества» [1]. Уровень надежности (УН) машиностроительного изделия, обеспечивающий его использование в определенных условиях эксплуатации (УЭ), определяет безотказность. С ужесточением условий эксплуатации (повышение нагрузочно-скоростных режимов, температуры и активности окружающей среды, воздействие вибраций и ударных нагрузок и т.п.) уровень надежности изделия снижается. Коэффициент запаса надежности Кн характеризует возможность эксплуатации изделия при определенном соотношении показателей УН и УЭ. При $К_{н1} = 1$ изделие удовлетворяет требованиям эксплуатации, оговоренным техническими условиями ($ТУ_1$) при заданном уровне надежности. Функция УЭ = f(УН) определяет зону безотказной эксплуатации и возможных отказов изделия (рис. 1, кривая 2). При разработке любого машиностроительного изделия создается определенный запас надежности, обусловленный использованными конструкторскими решениями, примененными материалами и технологиями изготовления и сборки отдельных комплектующих изделия. Кроме того, при определенном сочетании характеристик возможно проявление синергетического эффекта неаддитивного повышения потребительских характеристик изделия. Поэтому фактическое значение коэффициента запаса надежности $К_{н1ф} > Н_{н1}$. Изделие имеет гарантированный запас надежности $ГЗН_1$ и гарантированный запас эксплуатационных характеристик $ГЗЭ_1$ которые расширяют диапазон его эксплуатации (рис. 1, кривая 3). Повышение технических требований $ТУ_2$ к изделию смещает показатель $К_н$ в область более низких значений. При сохранении изделий с повышенными характеристиками, соответствующими уровню лучших мировых аналогов (инновационных изделий) $ТУ_и$, существенно изменяется диапазон надежной эксплуатации (рис. 1, кривые 4, 5).

Создание инновационных изделий с повышенными по сравнению с базовыми значениями $ГЗН_И$ и $ГЗЭ_И$ обеспечивает гарантированный установленный ресурс при жестких условиях эксплуатации с заданным уровнем надежности $К_{инф}$ (рис. 1, кривая 5). Величина показателя затрат на изготовление изделия Q коррелирует с уровнем надежности (рис. 1, кривая 6). Затраты на изготовление изделия с минимальным уровнем потребительских характеристик (рис. 1, кривая 1) минимальны.

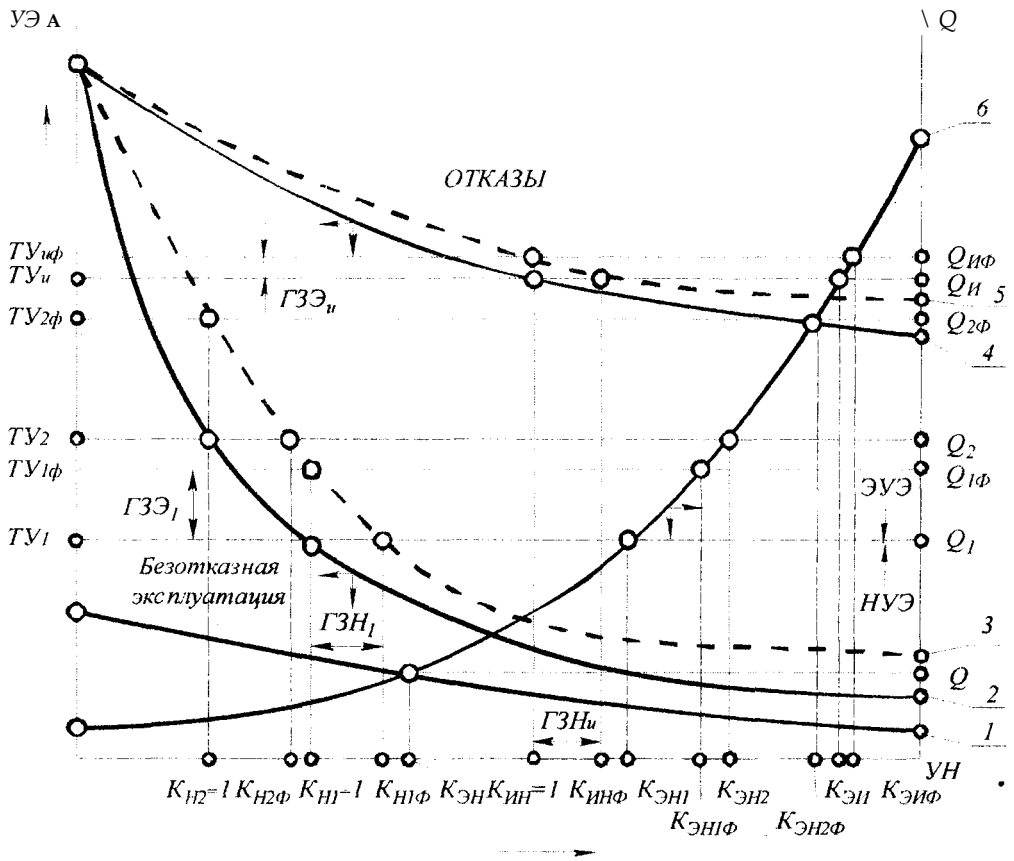

Рис. 1. Уровни экономической надежности машиностроительных изделий:

УЭ - условия эксплуатации; УН - уровень надежности; ТУ - требования технических условий на выпускаемое изделие; ГЗН - гарантированный запас надежности; ГЗЭ - гарантированный эксплуатационный запас; $ТУ_и$ - требования технических условий на инновационное изделие; Q - затраты на изготовление изделия; ЭУЭ - экстремальные условия эксплуатации изделия; НУЭ - нормальные условия эксплуатации изделия; $К_{н1}$ - коэффициент запаса надежности изделия, выпускаемого по ТУ; $К_{эн}$ - коэффициент экономического запаса надежности выпускаемого изделия; $К_{ин}$ - коэффициент запаса надежности инновационного (перспективного) изделия; Q,, - затраты на изготовление инновационного изделия

Увеличение качественных параметров изделия приводит к росту затрат $Q_и > Q_2 > Q_1$. При этом, учитывая превышение технических показателей изделия над значениями, оговоренными ТУ, фактические затраты на изготовление изделия $Q_{1ф}$, $Q_{2ф}$, и $Q_{иф}$ превышают значения расчетных Q_1, Q_2, $Q_и$. Разница между значениями $Q_{1ф}$, $Q_{2ф}$, $Q_{иф}$ и Q_1, Q_2, $Q_и$ составляет скрытые затраты, которые обусловливают превышение коэффициентов запаса надежности $К_{н1ф}$, $К_{н2ф}$, $К_{инф}$ над $К_{н1}$, $К_{н2}$, $К_{ин}$. Целесообразность затрат на изготовление можно характеризовать коэффициентом экономической надежности $К_{эн}$. Повышение значений ГЗЭ и ГЗН увеличивает значение коэффициента $К_{эн}$.

Совокупный анализ зависимости уровня надежности от условий эксплуатации и затрат на изготовление изделия позволяет наметить принципиальные направления создания машиностроительных изделий с заданными характеристиками потребительских свойств. Необоснованное завышение гарантированных показателей надежности (ГЗН) и условий эксплуатации (ГЗЭ) приводит к существенному увеличению затрат на изготовление. Вместе с тем при определении соотношения между величиной затрат и уровнем надежности (коэффициенты $К_н$ и $К_{эн}$) необходимо учитывать особенности эксплуатации изделия в заданных условиях в течение установленного ресурса.

В зависимости от функционального назначения изделия возможны различные подходы к финансированию процесса его разработки и изготовления (рис. 2). Первоначально затраченные на изготовление изделия ресурсы $Q_и$ с течением времени эксплуатации увеличиваются в связи с необходимостью текущего обслуживания (рис. 2, кривая 1). При несовершенной конструкции изделия или неэффективных материалах и технологиях изготовления затраты на обслуживание изделия увеличиваются в течение всего периода эффективной эксплуатации $\tau_{эф}$. Увеличение первичных затрат $Q_{и2}$ несколько увеличивает показатель $\tau_{эф2}$, однако суммарные затраты $Q_о$ и $Q_{оэ}$ практически не изменяются (рис. 2, кривая 2), так как увеличивается установленный ресурс изделия $\tau_{ур}$. Одним из возможных вариантов решения проблемы повышения технических характеристик изделий является использование наиболее простого конструкторского решения и недорогих материалов с последующими дополнительными затратами $Q_{р1}$ и $Q_{р2}$ при обязательном техническом обслуживании (рис. 2, кривая 3). При создании достаточно совершенного по конструкторско-технологическому решению и использованным материалам изделия первичные затраты $Q_{из}$ могут быть ниже $Q_{и2}$ при меньшей скорости нарастания эксплуатационных затрат и увеличении установленного ресурса изделия $\tau_{эф3}$ (рис. 2, кривая 4). В течение гарантированного периода $\tau_г$ такое изделие не требует дополнительного обслуживания.

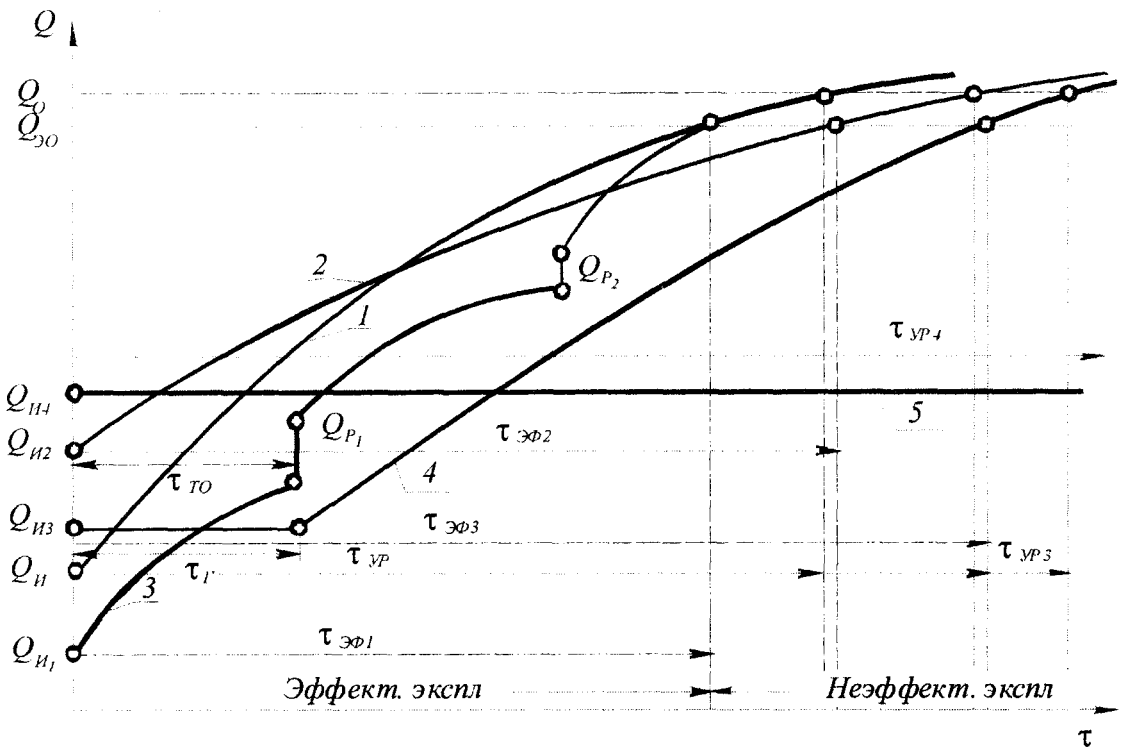

Рис. 2. Экономическая эффективность эксплуатации изделия:
$Q_о$ – общие затраты на эксплуатацию изделия; $Q_{оэ}$ – общие затраты при эффективном использовании изделия;
$Q_и$ – затраты на изготовление изделия; $Q_р$ – затраты на ремонт; $\tau_{эф}$ – период эффективной эксплуатации изделия;
$\tau_{ур}$ – установленный ресурс изделия; $\tau_{то}$ – период эксплуатации до технического обслуживания;
$\tau_г$ – период гарантированной эксплуатации

Использование современных инновационных решений при некотором увеличении затрат на изготовление $Q_{и4}$ обеспечивает эффективную эксплуатацию изделия в течение установленного ресурса при отсутствии дополнительных затрат на обслуживание (рис. 2, кривая 5). Такой подход к решению проблемы может быть признан оптимальным в случае соответствия экономической целесообразности принятого варианта с точки зрения критериев необходимости и достаточности, определенных по коэффициентам $К_н$ и $К_{эн}$ (см. рис. 1).

Современные технические требования к машиностроительным изделиям включают показатели, характеризующие способность к утилизации и повторному использованию. К ряду конструкций предъявляются требования 100 %-ного рециклинга, что обусловливает необходимость прогнозирования дополнительных затрат на стадии проектирования и изготовления изделия и внесение корректив в технические решения с оптимальными технико-экономическими показателями. Таким образом, необходима разработка показателей, определяющих эффективность технического решения машиностроительного изделия с учетом всех аспектов его изготовления, эксплуатации и рециклинга.

В общем виде зависимость экономической эффективности Q изделия от времени эксплуатации т можно представить в виде семейства кривых (рис. 3). При оптимальной конструкции изделия и эффективных использованных материалах зависимость экономической эффективности $Q_{ээ}$от времени его эксплуатации линейна (рис. 3, кривая 1) в течение длительного периода t, после которого наступает моральный износ. Зависимость величины прибыли $Q_п(t)$ имеет тенденцию к возрастанию (рис. 3, кривая 2). По мере увеличения времени эксплуатации скорость роста функции $Q_п = f(x)$ замедляется вследствие увеличения затрат на эксплуатацию изделия $Q_{иэ}$ поэтому зависимость суммарной эффективности $Q(t) = f(x)$ имеет экстремум и две точки пересечения с осью t (рис. 3, кривая 3).

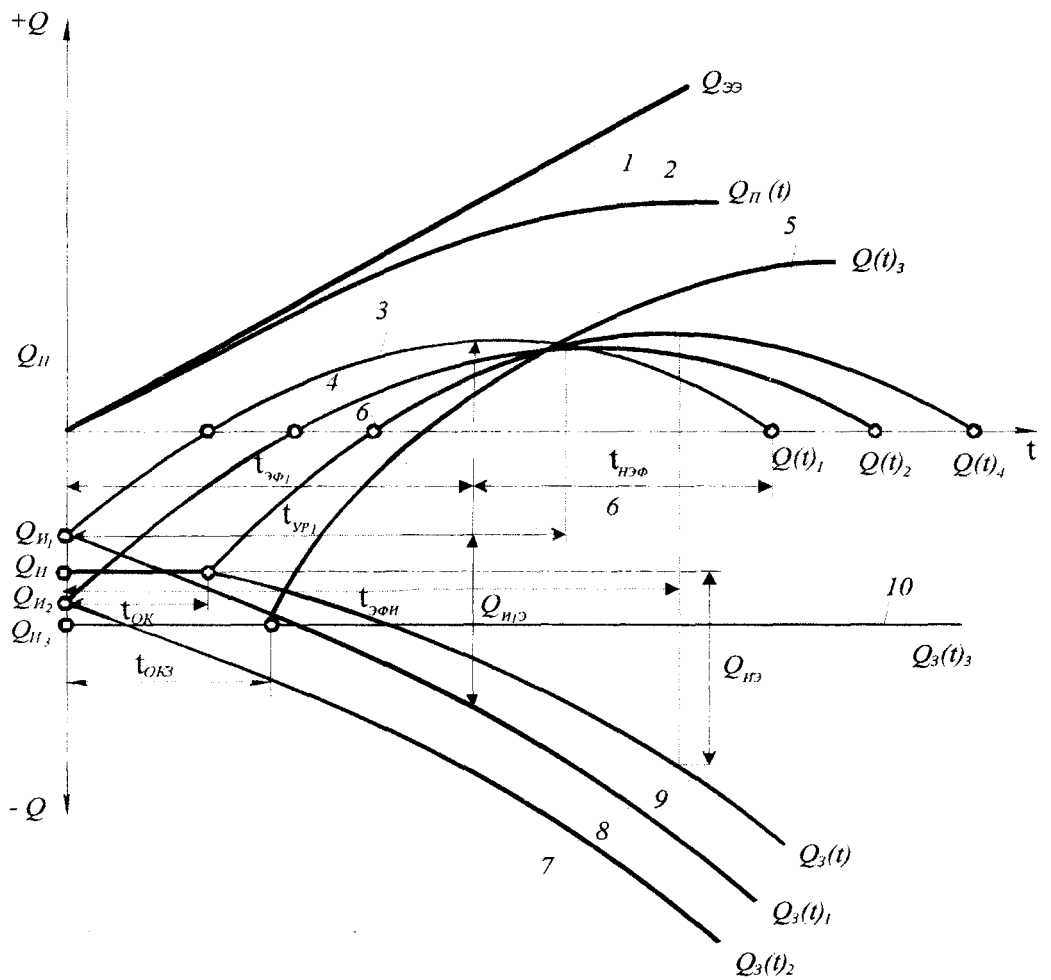

Рис. 3. Зависимость экономической эффективности эксплуатации машиностроительного изделия от времени:
Q – затраты; $Q_и$ – затраты на изготовление; $Q_{ээ}$ – экономическая эффективность;
$Q_{п(t)}$ – положительный экономический эффект (прибыль); $Q_{(t)}$ – суммарная экономическая эффективность;
$Q_{иэ}$ – затраты на эффективную эксплуатацию; $Q_{з(t)}$ – затраты на эксплуатацию во времени;
$t_р$ – период эффективной эксплуатации; $t_{нэф}$ – период неэффективной эксплуатации;
$t_{ур}$ – установленный ресурс; $t_{ок}$ – время окупаемости

Увеличение первоначальных затрат на создание изделия $Q_{и2}$ изменяет положение экстремума, не изменяя вида функции (рис. 3, кривая 4), так как затраты на эксплуатацию изделия значительны (рис. 3, кривые 7 и 8). Если оптимальные характеристики изделия при затратах $Q_{и2}$ не достигнуты, то максимум зависимости суммарной эффективности смещается в область длительной эксплуатации. При некоторых затратах $Q_и$ обеспечиваются условия, при которых существует некоторый период $\tau_{ок}$, равный $\tau_г$, в течение которого отсутствуют затраты на эксплуатацию и происходит окупаемость изделия. После времени $\tau_{ок}$ наблюдается рост затрат на эксплуатацию (рис. 3, кривая 9). При величине затрат $Q_{из}$ и оптимальных научно-технических решениях может реализоваться возможность его эксплуатации без дополнительных затрат (рис. 3, кривая 10). В этом случае после окупаемости первичных затрат в течение $\tau_{окз}$ зависимость Q(t) изменяет свой вид и характеризуется увеличением показателя Q от времени эксплуатации вплоть до морального износа изделия (рис. 3, кривая 10). Изменение величины первоначальных затрат приводит к изменению установленного ресурса изделия $\tau_{ур}$. Таким образом, в общем случае

$$Q(t) = Q_п(t) - [Q_и + Q_э(t)], \tag{1}$$

а при оптимальном сочетании конструкционных, материаловедческих и технологических аспектов изготовления изделия

$$Q(t) = Q_п(t) - Q_и. \tag{2}$$

Общие затраты на изготовление изделия $Q_и$ складываются из затрат на конструирование, изготовление оснастки, испытания опытного образца, его доработку по результатам испытаний и мероприятия по серийному его освоению.

Учитывая, что при изготовлении изделия используют как традиционные материалы и технологии, так и инновационные, суммарные затраты составят

$$Q_и = Q_{итт} + Q_{иит}. \tag{3}$$

Очевидно, что с увеличением доли затрат на инновационную составляющую $Q_{иит}$ будет возрастать экономическая эффективность изделия в связи с увеличением срока его эффективной эксплуатации.

В сложившихся условиях хозяйствования и при определенных структурных связях изготовителей изделий, их потребителей и поставщиков сырья и полуфабрикатов доля затрат $Q_{итт}$ достаточно велика. Применение инновационных технологий и новых материалов ($Q_{иит}$) обоснованно только в том случае, если время эффективной работы изделия $t_{эф}$ будет достаточным для их окупаемости первичных затрат $Q_и$ и обеспечения суммарного эффекта. Поэтому эффективность затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией изделия, необходимо соотносить с периодом его целесообразной эксплуатации $T_э$, определяя удельные суммарные затраты

$$K_у = \frac{Q_и + Q_э}{T_э} = \frac{Q_{итт} + Q_{иит} + Q_э}{T_э}, \tag{4}$$

где $T_э$ – длительность целесообразной эксплуатации.

Время $T_э$ несколько превышает $t_{эф}$, что обусловлено необходимостью некоторого периода времени на замену изделия на более эффективное или связано с условиями эксплуатации оборудования, в состав которого входит изделие.

При эффективных инновационных затратах

$$K_у = \frac{Q_{итт} + Q_{иит}}{T_э}. \tag{5}$$

Период целесообразной эксплуатации изделия определяется установленным ресурсом машины, в состав которой входит изделие. В зависимости от функционального назначения изделия на практике реализуют три подхода:

1) обеспечение гарантированного срока эксплуатации изделия до времени обязательного технического обслуживания $\tau_о$ машины (см. рис. 2, кривая 3) при минимальных затратах на его изготовление $Q_{и1}$;

2) обеспечение установленного ресурса изделия $\tau_{ур}$ при исходных затратах $Q_и$ и минимальных затратах на обслуживание $Q_{иэ}$;

3) увеличение затрат на изготовление изделия $Q_и$ с максимальной долей инновационных технологий $Q_{иит}$, обеспечивающих эффективную эксплуатацию изделия без дополнительного обслуживания в течение практически неограниченного срока (до морального износа). В этом случае суммарные затраты на изготовление и эксплуатацию существенно ниже уровня затрат по первым двум вариантам и значение коэффициента $K_у$ минимально.

Данные подходы к созданию машиностроительных изделий с различной экономической эффективностью были реализованы при промышленном выпуске автомобильных агрегатов различного функционального назначения. Карданные передачи обеспечивают требуемые параметры перемещения, работоспособности исполнительного оборудования, комфортности и энергопотребления автомобилей, тракторов, сельскохозяйственной техники, железнодорожного и городского транспорта. Совокупность инновационных решений карданных передач различного исполнения определяется требованиями технических условий на конкретную модификацию. Например, карданные передачи, применяемые в железнодорожном транспорте, должны иметь ресурс эксплуатации не менее 1 млн. км пробега при гарантированных показателях надежности. В таких конструкциях предложено:

- применение комплекса конструкторско-технологических и материаловедческих инноваций, которые включают использование градиентных материалов на основе сталей пониженной прокаливаемости 60 ПП, 80 ПП для изготовления крестовины универсального шарнира, многофункционального композиционного покрытия на рабочие поверхности шлицевого соединения, специальных смазок с повышенной стойкостью к трибохимическим превращениям и несущей способностью для игольчатых подшипников универсального шарнира;
- применение комплексного конструкторско-материаловедческого подхода к обеспечению минимального уровня абразивного изнашивания всех подвижных сопряжений с помощью уплотнений особой конструкции из износостойкого композиционного материала;
- снижение уровня динамических нагрузок на сопряженные поверхности и трансмиссию транспортного средства путем оптимизации массы, габаритов и применения специальной конструкции крепежных фланцев;
- использование лакокрасочных композиционных материалов с повышенными адгезионными характеристиками и абразивостойкостью для защиты от абразивного действия и коррозии [5, 7].

Такой подход сопряжен с большими инновационными затратами и потребовал изменения всего технологического процесса изготовления карданных передач, включающего разработку оптимальной конструкции с минимальной материалоемкостью, создание технологического оборудования для формирования градиентных структур и нанесения композиционных покрытий, создание системы многоуровневого контроля качества технологических процессов изготовления, сборки и предпродажной подготовки. Разработанные конструкции карданных передач серии «Белкард-2000» обеспечивают практически 100 % рециклинга после износа автотракторной техники или сельскохозяйственного оборудования.

Средства, затраченные на инновационные разработки, позволили создать предпосылки для совокупного управления показателями качества и надежности карданных передач в зависимости от сферы их применения. Для автотракторной продукции, выпускаемой крупнейшими производителями стран СНГ (МАЗ, МТЗ, КАМАЗ, УРАЛАЗ), используют карданные передачи со всем комплексом упомянутых инновационных решений. В результате гарантированный ресурс передач без дополнительного обслуживания превышает 500 тыс. км пробега, что заметно превосходит установленный ресурс выпускаемых автомобилей и тракторов. Достигнутые показатели потребительских характеристик обеспечили устойчивое положение ОАО «Белкард» на рынке стран СНГ и ближнего зарубежья при наличии крупных производителей автомобильных карданных валов на Украине (Чернигов, Херсон) и в России (Москва, Арзамас, Куйбышев, Иркутск, Набережные Челны).

Карданные передачи сельскохозяйственной техники включают только некоторые составляющие комплексного инновационного подхода, которые обеспечивают заданное значение показателя K_y. Это обусловлено существенно более низкими требованиями по установленному ресурсу и эргономичности на сельскохозяйственное оборудование [7].

Автомобильные амортизаторы, предназначенные для обеспечения условий оптимальной безопасности и эргономичности эксплуатации транспортных средств, выпускаемые на ОАО «Гродненский завод автомобильных агрегатов», имеют установленный ресурс не менее 100 тыс. км пробега. Для достижения такого эксплуатационного ресурса применен комплекс конструкторско-технологических решений, которые состоят в использовании композиционных износостойких покрытий для штока амортизатора, абразивостойких уплотнительных материалов для подвижных сопряжений, специальных амортизирующих сред. Вместе с тем практика показывает, что современные подходы к разработке изделий подобного типа для транспортных средств общего назначения (массовых серий) базируются на принципе минимизации исходных затрат. Для его реализации используют конструкторские решения с минимальным числом изнашиваемых сопряжений и комплектующими деталями из относительно дешевых конструкционных материалов. Особая роль в таких конструкциях предназначена функциональным покрытиям, обеспечивающим требуемый ресурс эксплуатации изделия. Автомобильные амортизаторы, созданные на основе принципа минимизации (см. рис. 2, кривая 3), при техническом обслуживании машины заменяют на новые. Таким образом, суммарные затраты на их применение при гарантированном показателе $\tau_{ур}$ не превышают затрат на применение более дорогих модификаций.

В конструкциях тормозных камер реализованы подходы, обеспечивающие надежность их применения в различных условиях эксплуатации при гарантированном установленном ресурсе, превышающем ресурс транспортного средства, что обусловлено особыми требованиями по безопасности, предъявляемыми к агрегатам подобного назначения.

Заключение. Проведенный анализ конструкторско-технологических и материаловедческих аспектов создания и эксплуатации машиностроительных изделий различного функционального назначения свидетельствует о существующей зависимости между суммарными затратами и требованиями технических условий. Объективные показатели, отражающие эффективность использованных материалов, технологий в конструкциях изделия с точки зрения оптимального соотношения суммарных затрат и установленного ресурса при гарантированном выполнении требований надежности, отсутствуют. Это приводит в ряде случаев к необоснованно высоким удельным затратам, снижающим эффективность применения изделий. Необходима разработка новых подходов к оценке эффективности затрат на инновационные проекты для совершенствования машиностроительной продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. ИСО 9000:2000. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
2. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 573 с.
3. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1984. - 320 с.
4. Лукинский В.С., Зайцев Е.И. Прогнозирование надежности автомобилей. - Л.: Политехника, 1991. - 280 с.
5. Кравченко В.И. Структура и технология композиционных материалов для конструкций карданных передач серии «Белкард-2000»: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01.-Новополоцк, 2001.- 16 с.
6. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. - М.: Машиностроение, 1972. - 320 с.
7. Костюкович Г.А. Композиционные материалы для универсальных шарниров нагруженных карданных передач автотракторной и сельскохозяйственной техники: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. - Новополоцк, 2003. - 17 с.
8. Мамончик А.И. Гидравлические двухтрубные амортизаторы разборные или закатные // Автомобильная промышленность. - 1999. - № 9. - С. 16 - 17.
9. Пильгуй В.Б. Совершенствование мембранных исполнительных механизмов пневматического тормозного привода автомобилей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.02. - Харьков, 1996. - 18 с.