
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Выпуск 8

Издается с декабря 2012 г.

Выходит один раз в год

Минск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

КОЛОНКА РЕДАКТОРА	8
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ	
<i>БАХМУТОВ С.В., КЕЛЛЕР А.В.</i> Концепция цифрового проектирования наземных транспортных средств	9
<i>ГРОШЕВ А.М., ТУМАСОВ А.В., РОГОВ П.С., ИВАНОВ М.В., СУДАРСКИЙ Е.В., ФИЛИМОНОВ О.В.</i> Перспективные исследования и разработки в области инновационных транспортных средств.....	14
МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ	
<i>ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ Ю.М., МИХАЙЛОВ М.И., ТЕТЕРИЧ Н.Э.</i> Моделирование динамических процессов в защитных экранах робототехнических систем.....	18
<i>МОИСЕЕВ Е.А.</i> Повышение устойчивости движения седельного автопоезда путем совершенствования колесного тормоза полуприцепа	21
<i>ПЕТРЕНКО М.Л., КИМ В.А.</i> Теоретические основы создания системы следящего торможения велосипеда «Аист»	26
<i>ЮШКЕВИЧ А.В., КИМ В.А.</i> Теоретическое обоснование метода диссипации кинетической энергии мотоцикла «Минск» при торможении	30
<i>КИМ В.А., СКОЙБЕДА А.Т., САЗОНОВ И.С., БИЛЫК С.Ю., МОИСЕЕВ Е.А., ПЕТРЕНКО М.Л., ЮШКЕВИЧ А.В., ШАШЕНКО С.Ф.</i> Математическая модель динамики разгона тягача с прицепным	

звеном (полуприцеп/прицеп) и алгоритм превентивной передачи момента колесам прицепного звена.....	34
<i>ТАРАСИК В.П., САВИЦКИЙ В.С.</i>	
Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей карьерных самосвалов БЕЛАЗ.....	41
<i>ТАРАСИК В.П., САВИЦКИЙ В.С.</i>	
Методика проектирования механизма управления фрикционами гидромеханической передачи карьерного самосвала	45
<i>ЕРМАК А.О., ЕЛОВОЙ О.М., КАДИЛЬНИКОВА Т.М., ВОЛКОТРУБ Р.Е.</i>	
Анализ и оптимизация технологии проектирования и изготовления оборудования точного электронного машиностроения. Часть 1. Математическая модель выбора компонентов оборудования	53
<i>ЕРМАК А.О., ЕЛОВОЙ О.М., КАДИЛЬНИКОВА Т.М., ВОЛКОТРУБ Р.Е.</i>	
Анализ и оптимизация технологии проектирования и изготовления оборудования точного электронного машиностроения. Часть 2. Методика предварительного выбора компонентов	57
<i>БЕЛАБЕНКО Д.С., АЛЬГИН В.Б.</i>	
Классификация и визуальное представление результатов оценки нагруженности трансмиссии в переходных процессах	60
<i>КУЗНЕЦОВ В.В., ПОЛЯКОВСКИЙ В.В.</i>	
Алгоритмизация бесколлизийных перемещений трех планарных позиционеров на одном статоре	64
<i>МАРКО А.Ф., ТИТКО Д.С., СЕРГЕЕВ Д.А.</i>	
Управление системами многокоординатных перемещений в режиме реального времени	68
<i>САЛМАНЗАДЕХ Г.Й., КАРПОВИЧ С.Е., РЫМКО В.М., ДРОГУН Е.А.</i>	
Математическая модель и алгоритмизация обратной задачи кинематики многокоординатной системы перемещений.....	71
<i>КОЛЕСНИКОВИЧ А.Н., ЛОПУХ Д.Г., КРАВЧЕНОК Алексей Л., КРАВЧЕНОК Александр Л., ТРОФИМЧУК А.А.</i>	
Разработка математических моделей электромобиля для расчетов тягово-скоростных свойств и энергопотребления с различными параметрами тягового привода.....	76
<i>ЛЕШКЕВИЧ С.В., ЖЕЛЕЗНЯКОВА Т.А., САЕЧНИКОВ В.А.</i>	
Элементы мехатроники в лабораторном практикуме по физике для повышения эффективности обучения студентов естественнонаучных специальностей университета	81
<i>ЛИСОВСКИЙ Э.В., ЛИТВИНЮК П.С., ШЛЯЖКО С.А.</i>	
Оценка соответствия требованиям ISO 3471 и доработка конструкции ROPS методом компьютерного моделирования.....	84
<i>СТРОК Е.Я., БЕЛЬЧИК Л.Д., АНАНЧИКОВ А.А., АЛЕКСАНДРОВА Т.Л.</i>	
Формирование управляющего воздействия в адаптированном к нагрузке электрогидравлическом приводе навесного устройства	90
<i>СТРОК Е.Я., БЕЛЬЧИК Л.Д., АНАНЧИКОВ А.А., ЗОРИЧ П.А.</i>	
Снижение непроизводительных затрат мощности при управлении рабочими органами пахотного агрегата.....	95
<i>СКОЙБЕДА А.Т., ЖУКОВЕЦ В.Н., КАЛИНА А.А., КОМЯК И.М.</i>	
Перспективные ходовые системы мобильных машин	100

<i>ЛОПУХ Д.Г., КОЛЕСНИКОВИЧ А.Н., РОМАНЕНКО М.В., КРАВЧЕНКО Александр Л., ДРОБЫШЕВСКАЯ О.В.</i>	
Сравнительная оценка силовой нагруженности рулевого управления самосвала 8×8 с использованием твердотельных и упругих моделей рулевых штанг и рычагов	104
<i>ЖДАНОВИЧ Ч.И.</i>	
Математическое моделирование тягового сопротивления полунавесного оборотного плуга.....	108
<i>РОМАНОВИЧ А.С., КОНОПЛЯНИК И.А., ЛОБКОВА М.П.</i>	
Мониторинг нагруженности механических приводов исполнительного органа и управление параметрами функционирования проходческо-очистного комбайна «Универсал–600»	112
<i>РОМАНОВИЧ А.С.</i>	
Нагруженность компонентов электромеханических приводов исполнительного органа проходческо-очистного комбайна «Универсал–600»	117
<i>БАСИНЮК В.Л., КОВЕНСКИЙ А.Е., ЛОБКОВА М.П., КОЗИНЕЦ А.В., МОРОЖАНОВ Е.А.</i>	
Программно-аппаратный комплекс и методика исследований параметров функционирования прецизионного оборудования ОАО «Планар»	121
<i>СОЛДАТЕНКО Д.С.</i>	
Системы векторного управления тяговым электромеханическим приводом тракторов.....	125
<i>СОЛДАТЕНКО Д.С.</i>	
Расчет электромеханических параметров тягового электропривода тракторов.....	129
<i>КОВЕНСКИЙ А.Е.</i>	
Влияние упруго-податливых свойств натяжного устройства на колебания стола установки для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы.....	132
<i>КОЗИНЕЦ А.В., МОРОЖАНОВ Е.А., ГЛАЗУНОВА А.А., ЛОМАКО В.Г., ПАПИНА С.С.</i>	
Активное управление амплитудой механических колебаний в приводах точного электронного машиностроения	136
<i>ХОЛОД Е.А., КАРПУК Н.В.</i>	
Методика определения индекса возможного ущерба.....	140
<i>ЛИТАРОВИЧ В.В., МЫЛЬНИКОВ Е.В., САВЧЕНКО В.В., ЧЕРНИН М.А.</i>	
Анализ информационных потоков в коммуникационной платформе C-V2X.....	145
<i>КОЗИНЕЦ А.В., МОРОЖАНОВ Е.А., ГЛАЗУНОВА А.А.</i>	
Выбор рациональных типов приводных систем зондового оборудования для экстремальных условий тестирования	148
<i>КОВЕНСКИЙ А.Е., БАСИНЮК В.Л., ГЛАЗУНОВА А.А.</i>	
Мониторинг и управление параметрами колебаний высокоскоростного электрошпинделя на аэростатических подшипниковых опорах	154
<i>ДУБОВСКИЙ В.А., САВЧЕНКО В.В.</i>	
Метод контроля профессионально важных качеств водителей транспортных средств.....	159

<i>БАХМУТОВ С.В., ТЕРЕНЧЕНКО А.С., КОЗЛОВ А.В.</i> Повышение эффективности двигателей внутреннего сгорания путем добавления водородсодержащего синтез-газа к моторному топливу.....	162
<i>ВАЙТЕХОВИЧ П.Е., ФРАНЦКЕВИЧ В.С., БОРОВСКИЙ Д.Н., КОЗЛОВСКИЙ В.И.</i> Особенности движения элементов загрузки в высокоэффективных измельчающих агрегатах.....	167

НАДЕЖНОСТЬ, ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

<i>ALGIN V.B., ISHIN N.N., STARZHINSKY V.E., SHIL'KO S.V., RACKOV Milan, ČAVIĆ Maja</i> Development of digital twins for gears and transmissions based on lifetime mechanics and composites mechanics.....	172
<i>ALGIN V.B., GOMAN A.M., SKOROKHODOV A.S.</i> Main operational factors determining the energy consumption of the urban electric bus: schematization and modelling	185
<i>STARZHINSKY V.E., SHIL'KO S.V., SHALOBAEV E.V., RACKOV Milan</i> Polymer gears: design, technology, application (review).....	195
<i>СОСНОВСКИЙ Л.А.</i> Механотермодинамика: единая модель трения, остаточной деформации и износа	199
<i>ЩЕРБАКОВ С.С.</i> Модели состояний трибофатических и механотермодинамических систем	204
<i>ПОДДУБКО С.Н., ИШИН Н.Н., ГОМАН А.М., СКОРОХОДОВ А.С., ШПОРТЬКО В.В.</i> Расчетная оценка запаса хода электромобиля на одной зарядке аккумуляторной батареи	209
<i>ШИМАНОВСКИЙ А.О., САХАРОВ П.А.</i> Оценка влияния характеристик поглощающих аппаратов сцепных устройств на продольные силы в грузовом поезде	216
<i>АФАНАСЬКОВ П.М., ПАСТУХОВ М.И., КОНОВАЛОВ Е.Н., БЕЛОГУБ Н.В.</i> Прогнозирование остаточного ресурса тележек пассажирского вагона после длительной эксплуатации.....	220
<i>ПУТЯТО А.В., БРИЛЬКОВ Г.Е.</i> Оценка устойчивости против схода с рельса и прочности колеса маневрового тепловоза серии ЧМЭЗ при движении в кривой малого радиуса	227
<i>КАЛИНЦЕВ Ю.В., ВЫСОЦКАЯ Н.А.</i> Влияние формы внутренней поверхности корпуса напорного шнекового модуля на направление движения подаваемого материала	233
<i>ГРОМЫКО П.Н., ХАТЕТОВСКИЙ С.Н.</i> Минимизация габаритных размеров эксцентриковых передач на основе совершенствования геометрии зацепления контактирующих колес	238
<i>ИШИН Н.Н., ГОМАН А.М., СКОРОХОДОВ А.С., НАТУРЬЕВА М.К., ДАКАЛО Ю.А.</i> Расчетная оценка параметров ударных импульсов в подшипниках качения в зависимости от износа их элементов.....	242

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

НЕЛЮБ В.А., ЧУДНОВ И.В., ФЕДОРОВ С.Ю.

Исследование физических свойств углеродной ленты с тонкопленочным медным покрытием246

КАНЕ М.М., ШЕЛЕГ В.К., КРАВЧУК М.А., КОТ П.И.

Анализ взаимосвязей некоторых параметров качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен с режимами зубофрезерования251

КАЛИНЦЕВ Ю.В., ПИСКУН Е.В., КОДНЯНКО М.Ю.

Исследование сталей, применяемых для изготовления оборудования, работающего в агрессивной среде256

МИХАЙЛОВ М.И., ЛУКЪЯНЧИК К.В.

Моделирование процессов сварки рамных конструкций262

ЖОРНИК В.И.

Электроконтактное спекание твердосплавных рабочих элементов фильер для правки арматурной проволоки265

КОНСТАНТИНОВ В.М., КОВАЛЬЧУК А.В., ДАШКЕВИЧ В.Г., ЩЕРБАКОВ В.Г., АСТРАШАБ Е.В.

Опыт химико-термического упрочнения штамповой оснастки пищевых производств272

ДЕВОЙНО О.Г., ПИЛИПЧУК А.П., ЛОЧС С.

Формирование функционально-градиентных покрытий комбинированным методом газотермического напыления и лазерной обработки277

САНДОМИРСКИЙ С.Г.

Анализ параметров для магнитного контроля твердости стали 40Х283

АНТОНЮК В.Е., ЯВОРСКИЙ В.В.

Методика расчета напряженного состояния кольца при реализации циклического нагружения286

СКОЙБЕДА А.Т., КАЛИНА А.А., ДЕВОЙНО О.Г.

Лазерное упрочнение зубчатых колес из высокопрочного чугуна289

КУКАРЕКО В.А., БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М.А., ГРИГОРЧИК А.Н., АСТРАШАБ Е.В., СОСНОВСКИЙ А.В.

Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и износостойкость газотермических покрытий из железо-алюминиевых псевдосплавов294

КОНСТАНТИНОВ В.М., БУЛОЙЧИК И.А., КОНОН А.А.

Проблемы прочности оцинкованных стальных изделий299

ШИЛЬКО С.В., РЯБЧЕНКО Т.В., ГАВРИЛЕНКО С.Л., НАУМОВ М.А., НАУМОВА Н.Ю.

Анализ деградации механических свойств стеклопластика в водной среде при эксплуатации трубопровода304

ШИЛЬКО С.В., ГАВРИЛЕНКО С.Л., ПАНИН С.В., АЛЕКСЕНКО В.О.

Анализ вязкоупругих свойств полиэфирэфиркетона и дисперсно-наполненных композитов на его основе по данным ускоренных релаксационных испытаний308

<i>МАРУКОВИЧ Е.И., КУКАРЕКО В.А., ГРИГОРЧИК А.Н., САЗОНЕНКО И.О., ХАРЬКОВ В.А.</i> Структура, фазовый состав и механические свойства малоразмерных бронзовых отливок Cu—Fe и Cu—Sn—P	311
<i>КУШНЕРОВ А.В., САЧИВКО Я.С., ТАРАСЕВИЧ И.Ю., ШАПАРЬ В.А.</i> Адгезионная прочность и структурно-фазовое состояние вакуумно-дуговых покрытий на основе титана и хрома, сформированных на различных подложках.....	313
<i>ЛЕВАНЦЕВИЧ М.А., ПИЛИПЧУК Е.В., МАКСИМЧЕНКО Н.Н.</i> Повышение долговечности непрофилированного электрода-щетки для комбинированной чистовой обработки	317
<i>БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М.А., КОМАРОВ А.И., СОСНОВСКИЙ И.А., ОРДА Д.В., КУРИЛЕНКО А.А., ИСКАНДАРОВА Д.О.</i> Технологические особенности получения биметаллических втулок с антифрикционным покрытием из сплава АК12.....	320
<i>ЖОРНИК В.И., ИВАХНИК А.В., ЗАПОЛЬСКИЙ А.В., ИВАХНИК В.П., БУХТИЛОВА М.А.</i> Механизм структурообразования дисперсной фазы биоразлагаемой литий-кальциевой смазки.....	325
<i>АНТОНЮК В.Е., РУСЕЦКИЙ В.Н., СОЛОМИНА А.В.</i> Особенности использования ГОСТ 1643-81 при назначении параметров точности для производственного двухпрофильного контроля	329
<i>ПАПКОВСКИЙ П.И., ВАЛЬКО А.Л., САНДОМИРСКИЙ С.Г., ВОЙТОВИЧ Д.О.</i> О возможной причине образования трещин в деталях, полученных центробежным электрошлаковым переплавом.....	333
<i>ЛЕВАНЦЕВИЧ М.А., ПИЛИПЧУК Е.В., КУШНЕРОВ А.В., СУХОЦКИЙ П.Г.</i> Коррозионная стойкость электродеформационно плакированных хромовых покрытий.....	336
<i>ЛЕВАНЦЕВИЧ М.А., ЮРУТЬ Е.Л., МАКСИМЧЕНКО Н.Н., СУХОЦКИЙ П.Г.</i> Оценка антипригарных свойств электродеформационно плакированных покрытий из композитов на основе хрома.....	340
<i>КОМАРОВ А.И., РОМАНЮК А.С., ЗОЛОТАЯ П.С., ГОРАНСКИЙ Г.Г., ВАГАНОВ В.В.</i> Повышение гидроабразивной стойкости изделий совмещением методов холодного газодинамического напыления и микродугового оксидирования	343
<i>СЕРЕНКОВ П.С., РУДНИЦКИЙ Ф.И., САЦУКЕВИЧ А.А., ВОЛКОТРУБ Р.Е.</i> Повышение эффективности техники планирования эксперимента на этапе разработки инновационных материалов и покрытий	348
<i>ВИТЯЗЬ П.А., СЕНЮТЬ В.Т., ЖОРНИК В.И., ВАЛЬКОВИЧ И.В., ПАРНИЦКИЙ А.М., КОВАЛЕВА С.А., АФАНАСЬЕВ В.П.</i> Синтез наноструктурного алмаз-лонсдейлитного инструментального композита для абразивной обработки.....	352
<i>СОТНИКОВ М.В., СИДОРЕНКО А.Г., МОИСЕЕНКО В.И.</i> Новые подходы к изготовлению мелко модульных зубчатых колес	357

*ЧИЖИК С.А., ХЕЙФЕЦ М.Л., БОРОДАВКО В.И., КЛИМЕНКО С.А.,
КОЛМАКОВ А.Г., ПАНИН А.В., ЧУГУЙ Ю.В., БАТАЕВ А.А.,
БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю., КРЕЧЕТОВ А.А., ПРЕМЕНТ Г.Б.*
Обеспечение параметров качества поверхностного слоя
изделий с покрытиями361

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА. БИОМЕХАНИКА

НИКИТИН И.С., БУРАГО Н.Г.
Определяющие уравнения полумикроскопических теорий
вязкопластичности и пластичности для многоосного
напряженного состояния.....365

AVETISYAN A.S., KHACHTRYAN V.M.
Reflection and transmission of electro-elastic waves at plane
non-acoustic contact interface of two different piezoelectric half-spaces370

ЧИГАРЕВ А.В., ЖУРАВКОВ М.А.
Модель детектирования гравитационных волн на основе
связанной системы уравнений упругости и гравитации.....375

УДК 621.37/.39.002.2; 621.37/.39.002.5

А.О. ЕРМАК

ОАО «Планар», г. Минск, Республика Беларусь

О.М. ЕЛОВОЙ, канд. техн. наук

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

Т.М. КАДИЛЬНИКОВА, д-р техн. наук

Пинский государственный университет, Республика Беларусь

Р.Е. ВОЛКОТРУБ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ. ЧАСТЬ 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА КОМПОНЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ

Разработана математическая модель выбора компонентов оборудования для его оптимального проектирования и изготовления по критерию минимума полных ожидаемых затрат, учитывающая затраты, связанные с мониторингом их технического состояния в процессе эксплуатации, восстановлением работоспособности и потерями, обусловленными простым оборудованием.

Ключевые слова: математическая модель, мониторинг, оптимизация, стоимость, электронное машиностроение, эксплуатационные затраты

Введение. В технологии создания современных изделий точного машиностроения, изготавливаемых единично или малыми партиями, существует тенденция максимально широкого использования серийно изготавливаемых механических, электромеханических и иных компонентов, выпускаемых специализированными предприятиями. Как правило, эти компоненты у различных изготовителей при близких технических характеристиках существенно различаются по качеству и стоимости. Поэтому, например, в космической технике их разделяют на три группы [1]:

- компоненты первой группы, имеющие максимально достижимое качество и соответственно самую высокую стоимость;
- компоненты второй группы, имеющие среднее качество и существенно меньшую стоимость;
- компоненты третьей группы, самые дешевые из приведенных выше, но и наименее качественные.

При этом могут быть использованы еще более дешевые компоненты, не вошедшие в первые три группы, но их использование в качестве компонентов должно быть технически и экономически обосновано [1–3].

К наиболее важным особенностям реализации этого подхода можно отнести наличие:

- баз данных компонентов первой, второй и третьей групп и их производителей;
- методик, позволяющих оценить влияние выбранного из той или иной группы компонента на обеспечение требуемого ресурса и риска его использования;
- контроля качества компонентов на стадии их производства, хранения и установки в изделие.

Необходимо отметить, что выше приведенная схема обеспечения требуемого уровня качества, включая ресурс, в значительной мере ориентирована на космическую технику, возможности мониторинга техническо-

го состояния, обслуживания и ремонта которой в ряде случаев крайне ограничены. В наземной технике такие возможности существенно шире и это, при наличии соответствующих критериев, может быть учтено при выборе компонентов, технологических схем изготовления и мониторинга при эксплуатации.

Цель исследований — разработка математической модели выбора компонентов оборудования, учитывающей их стоимость, долговечность и наработку на отказ, а также затраты на мониторинг, обслуживание и ремонт при эксплуатации.

Методические подходы. Для решения задачи создания ликвидного изделия точного электронного машиностроения с конкурентоспособным комплексом служебных свойств и стоимостью, включающей затраты на мониторинг и обслуживание в течение всего жизненного цикла, необходимо разработать технологию изготовления, учитывающую, как это показано на рисунке 1:

- стоимость и ресурс изготавливаемых и покупных компонентов;
- стоимость сборки, наладки и приемочных испытаний;
- стоимость эксплуатационного мониторинга;
- стоимость обслуживания и ремонта.

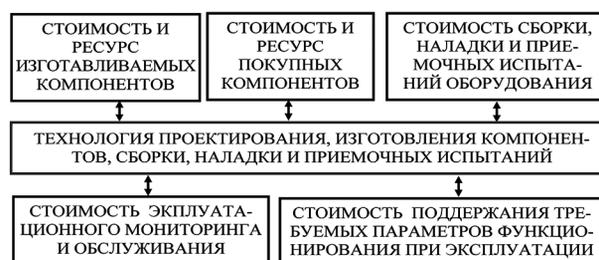


Рисунок 1 — Ориентировочная схема формирования стоимости изделия

Ориентировочная стоимость сборки, наладки и приемочных испытаний оборудования, как правило, определяется на основе опыта создания его аналогов на предприятии с учетом времени сборки и испытаний, требуемой квалификации специалистов и накладных расходов. Для определения допустимой стоимости изготавливаемых и покупных компонентов необходим анализ стоимости эксплуатационного мониторинга, обслуживания и ремонта этого оборудования при их использовании, на которую влияет долговечность и наработка на отказ этих компонентов. Должна быть получена расчетная зависимость, связывающая суммарную стоимость при принятом уровне качества изготавливаемых и покупных компонентов с соответствующей стоимостью эксплуатационного мониторинга, обслуживания и ремонта.

Ориентировочные стоимости изготавливаемых и покупных компонентов могут быть определены с использованием соответствующих, сформированных на предприятии-изготовителе, баз данных. Для оценки ориентировочной стоимости эксплуатационного мониторинга, обслуживания и ремонта целесообразна разработка соответствующей методики расчета.

Результаты исследований и их обсуждение. Задача разработки оптимального проектирования и технологического процесса создания конкурентоспособного ликвидного оборудования точного машиностроения с учетом требуемого уровня полных ожидаемых затрат в течение жизненного цикла, не превышающих его ликвидную стоимость, может быть сформулирована в виде вектора стоимости факторов, приведенных на рисунке 1:

$$\vec{H} = \vec{H}(h_1, h_2, \dots, h_i). \quad (1)$$

Требуется найти такое значение стоимости приведенных выше факторов (координаты вектора \vec{H}) и, с учетом качества изготавливаемых и покупных компонентов, определить такой план-график мониторинга технического состояния в процессе его будущей эксплуатации (матрицы обследований $X(N)$ и ремонтов $Y(N)$), который при минимизации полных ожидаемых затрат позволит обеспечить требуемые параметры функционирования в процессе эксплуатации.

Вектор вида

$$\vec{x}(i) = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}) \quad (2)$$

назовем вектором обследований технического состояния оборудования в момент времени t_i . Вектор $\vec{x}(i)$ определяет тот или иной вариант проведения (или отказ от проведения) обследований в момент времени t_i .

Моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$ будем называть контрольными, а всю совокупность $t_0, t_1, t_2, \dots, t_N$ — расчетной сеткой.

Обозначим через x_{ij} ($i=0, 1, 2, \dots, N-1; j=1, 2, 3, 4, 5$) бинарную переменную, принимающую значение 1, если в контрольной точке t_i принимается j -й вариант обследований, в противном случае — значение 0.

Учитывая общепринятую классификацию видов технических обследований оборудования, в каждой контрольной точке может быть принят один из следующих вариантов принятия решения, связанных с результатами мониторинга:

- продолжение эксплуатации без каких-либо технических обследований;
- проведение частичного технического обследования;

- проведение полного технического обследования;
- проведение полного (с дефектоскопией отдельных элементов) обследования;
- проведение полного технического обследования (с дефектоскопией) и ремонтом отдельных элементов.

Поскольку в контрольной точке t_i может быть принят единственный (из пяти возможных) вариант решения, то лишь одна координата вектора $\vec{x}(i)$ отлична от 0 и равна 1, т. е. справедливо равенство

$$\sum_{j=1}^5 x_{ij} = 1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (3)$$

Матрицей обследований технического состояния в момент времени t_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) назовем матричную функцию X_i размерностью $i \times 7$. Строками этой матрицы будут векторы обследований в предыдущих контрольных точках:

$$X(i) = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{02} & x_{03} & x_{04} & x_{05} \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{i-11} & x_{i-12} & x_{i-13} & x_{i-14} & x_{i-15} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Обозначим через y_{ij} ($i=0, 1, 2, \dots, N-1; j=1, 2, 3, \dots, m$) бинарную переменную, принимающую значение 1, если в контрольной точке t_i производится ремонт j -го конструктивного элемента, и 0, если такой ремонт в i -й контрольной точке не производится.

Вектор вида $\vec{y}(i) = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ будем называть вектором ремонтов оборудования в контрольной точке t_i . Данный вектор $\vec{y}(i)$ определяет тот или иной способ восстановления (если это необходимо) требуемого уровня надежности в момент времени t_i , где $i = 1, 2, 3, \dots, N-1$.

В частности, если все m координаты вектора $\vec{y}(i)$ равны 0, то это значит, что никакие ремонты в момент времени t_i не производятся. Если только одна координата вектора ремонтов $\vec{y}(i)$ отлична от 0, то в момент времени t_i производится ремонт только одного конструктивного элемента. Если отличны от 0 несколько координат вектора ремонтов $\vec{y}(i)$, то это значит, что в момент времени t_i требуется произвести ремонт более одного конструктивного элемента оборудования.

Матрицей ремонтов $Y(i)$ на момент времени t_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N-1$) назовем матричную функцию размерностью $i \times m$, строки которой являются векторами ремонтов в предшествующих контрольных точках:

$$Y(i) = \begin{pmatrix} y_{01} & y_{02} & y_{03} & \dots & y_{0m} \\ y_{11} & y_{12} & y_{13} & \dots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & \dots & y_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ y_{i-11} & y_{i-12} & y_{i-13} & \dots & y_{i-1m} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Полные ожидаемые затраты можно представить в виде:

$$P_0 = P_0 + P_3, \quad (6)$$

где P_0, P_3 — начальная стоимость оборудования и эксплуатационные затраты на поддержание его работоспособности во время использования соответственно.

Начальная стоимость оборудования может быть представлена в виде

$$P_0 = P_{0и} + P_{0к} + P_{0с}, \quad (7)$$

где $P_{0и}$ — стоимость изготавливаемых компонентов; $P_{0к}$ — стоимость комплектующих, тесно связанная с их эксплуатационным ресурсом и затратами на ремонт или замену; $P_{0с}$ — стоимость сборки, наладки и приемочных испытаний оборудования.

К наиболее сложно определяемому фактору из приведенных выше можно отнести эксплуатационные затраты P_{Σ} на поддержание работоспособности. Эти затраты (суммарные эксплуатационные затраты) складываются из затрат на проведение мониторинга P_x , затрат на производство ремонтов P_y , а также гипотетических убытков P_z из-за отказов оборудования за рассматриваемый период эксплуатации:

$$P_{\Sigma} = P_x + P_y + P_z. \quad (8)$$

Принимая во внимание одновременность финансовых затрат на рассматриваемом временном интервале $[t_0, T]$, суммарные затраты на проведение обследований технического состояния, приведенные к начальному моменту времени t_0 , определяются по формуле:

$$P_x = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^5 p_{ij} x_{ij} \exp[-r(t_j - t_0)], \quad (9)$$

где p_{ij} — стоимость j -го вида обследования в момент времени t_i (очевидно, что стоимость отсутствия проведения обследования $c_{i1} = 0$); r — параметр дисконтирования затрат:

$$r = Ln(1 + r_0), \quad (10)$$

где r_0 — средняя доходность экономической деятельности, определяемая банковской процентной ставкой с капитала.

Суммарные затраты на производство ремонтов, приведенные к начальному моменту t_0 , определяются следующим образом:

$$P_y = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^5 s_{ij} y_{ij} \exp[-r(t_j - t_0)], \quad (11)$$

где s_{ij} — стоимость производства ремонта j -го конструктивного элемента или его замены в момент времени t_i .

При ремонте j -го конструктивного элемента стоимость этого ремонта можно вычислить по формуле:

$$s_{ij} = p_{ij} \cdot k_{ij}, \quad (12)$$

где p_{ij} — начальная стоимость j -го конструктивного элемента; k_{ij} — коэффициент, характеризующий процент удешевления конструктивного элемента в процессе эксплуатации, определяемый по формуле:

$$k_{ij} = \frac{h_{0j} - h_{ij}}{h_{ij}}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (13)$$

где h_{ij} — проектная стоимость j -го конструктивного элемента; h_{0j} — начальная стоимость j -го конструктивного элемента; h_{ij} — стоимость j -го конструктивного элемента в момент обследования (момент времени t_i).

Гипотетические убытки P_z от отказов работоспособности за рассматриваемый период эксплуатации:

$$P_z = \int_{t_0}^T \omega^* [1 - P(t)] \cdot \exp(-rt) dt, \quad (14)$$

где ω^* — усредненная величина убытков, к которым приводит отказ оборудования, $P(t)$ — вероятность безотказной работы.

Обозначим через P^* такое значение вероятности безотказной работы оборудования, ниже которого его эксплуатация должна быть прекращена. Очевидно, что значение P^* должно быть близким к единице или может назначаться экспертным путем с учетом качества изготовления.

Пусть Q^* — сумма средств, отражающая финансовые возможности организации, эксплуатирующей оборудование, на его техническое обслуживание (величина Q^* может определяться исходя из нормы ежегодных амортизационных отчислений, которые в среднем по организациям составляют примерно 5 % от сметной стоимости оборудования).

Учитывая (1)–(14), модель выбора компонентов оборудования для его оптимального проектирования и изготовления по критерию минимума полных ожидаемых затрат можно представить в виде следующей задачи нелинейного программирования о поиске минимума функционала $F(x_{ij}, y_{ij}, p_{ij}, s_{ij}, r, t)$:

$$F(x_{ij}, y_{ij}, p_{ij}, s_{ij}, r, t) \rightarrow \min \leq [F], \quad (15)$$

где

$$F(x_{ij}, y_{ij}, p_{ij}, s_{ij}, r, t) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^5 p_{ij} x_{ij} \exp[-r(t_j - t_0)] + \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^5 s_{ij} y_{ij} \exp[-r(t_j - t_0)] + \int_{t_0}^T \omega^* [1 - P(t)] \cdot \exp(-rt) dt \quad (16)$$

при следующих ограничениях в виде неравенств:

$$P(\bar{H}, t) \geq P^*, \quad t \in [t_0, T]; \quad (17)$$

$$h_j^0 \leq h_j \leq h_j^+, \quad j = 1, 2, 3, \dots, l; \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^5 p_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^m s_{ij} y_{ij} \leq Q_j^*, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N-1; \quad (19)$$

и при следующих ограничениях в виде равенств:

$$\sum_{j=1}^5 x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N-1; \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^m y_{ij} \in [0, m], \quad i = 1, 2, 3, \dots, N-1. \quad (21)$$

Ограничения в виде неравенств:

- (17) — условие обеспечения эксплуатационной надежности на протяжении рассматриваемого периода эксплуатации;
- (18) — условие определяет область изменения искомым стоимостей h_j ;
- (19) — условие финансовой обеспеченности технических обследований и ремонтов, производимых в момент времени t_i .

Ограничения в виде равенств (20) и (21) определяют структуру векторов обследований $x(i)$ и ремонтов $y(i)$ в контрольных точках t_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N-1$).

Полученная задача нелинейного математического программирования может быть решена численно методом градиентного спуска (МГС).

Таким образом, технология оптимального проектирования и изготовления оборудования точного электронного машиностроения, обеспечивающая комплекс его конкурентоспособных свойств, включает в себя

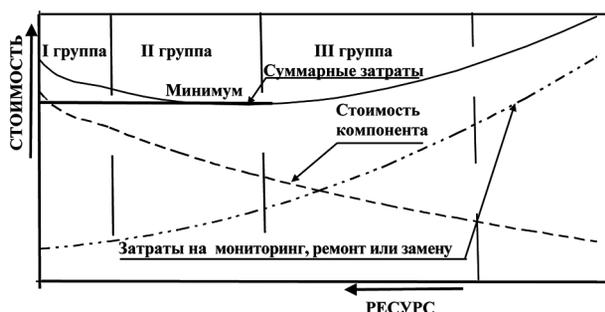


Рисунок 2 — Схема влияния сочетания исходной стоимости компонента оборудования и затрат на мониторинг его технического состояния, ремонт или замену на суммарные затраты, связанные с его использованием для I, II и III групп качества

определение номенклатуры приобретаемых и изготавливаемых компонентов, суммарная стоимость которых в сочетании со стоимостью мониторинга, ремонта или замены этих компонентов, определенной в соответствии с приведенной выше методикой, будет минимальна (рисунок 2) и в сочетании с остальными затратами обеспечит ликвидную стоимость оборудования.

Для определения рациональной конкретизированной номенклатуры приобретаемых компонентов целесообразно формирование баз данных, включающих:

- базу данных с информацией о предполагаемых к использованию серийно изготавливаемых компонентах, в частности, их моделях, поставщиках, стоимости, прогнозируемых ресурсах и наработке на отказ, деклариру-

емых поставщиком и, при возможности, сборе информации, данные потребителей;

- базу данных о ранее изготовленных или планируемых к изготовлению компонентах.

Заключение. Разработана математическая модель выбора компонентов оборудования для его оптимального проектирования и изготовления по критерию минимума полных ожидаемых затрат, учитывающая затраты, связанные с мониторингом технического состояния данных компонентов в процессе эксплуатации, восстановлением работоспособности и потерями, обусловленными простоем оборудования. Использование данной математической модели позволяет обеспечить ликвидную стоимость оборудования при конкурентоспособном комплексе его технических характеристик и экономической целесообразности изготовления, а также осуществить анализ и оптимизацию технологии его проектирования и изготовления.

Список литературы

1. Космическая техника. Обеспечение качества продукции. Компоненты электрические, электронные и электромеханические: СТБ ECSS-Q-ST-60C-2014. — Введ.: 01.10.2014. — Минск: Госстандарт, 2014. — 72 с.
2. Космическая техника. Обеспечение качества продукции. Анализ наихудшего случая: СТБ ECSS-Q-HB-30-01A-2014. — Введ.: 07.05.2015. — Минск: Госстандарт, 2015. — 16 с.
3. Космическая техника. Обеспечение качества продукции. Источники данных о надежности компонентов и их использование: СТБ ECSS-Q-HB-30-08A-2014. — Введ.: 14.05.2015. — Минск: Госстандарт, 2015. — 28 с.

Yermak A.O., Yelovoy O.M., Kadilnikova T.M., Volkotrub R.E.

Analysis and optimization of design and manufacturing technology of equipment for precision electronic engineering.

Part 1. Mathematical model of choice of equipment components

The mathematical model of the choice of components of equipment is developed for its optimum design and manufacture by criterion of minimum of the complete expected cost considering expenses, associated with monitoring of their technical condition in operation, maintenance and losses caused by equipment downtime.

Поступил в редакцию 17.07.2019.