

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ В ЗАДАЧАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И МОНИТОРИНГУ ПРОМЫШЛЕННОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

А.Ю. Андреев

Российская академия Ракетных и артиллерийских наук
Россия, 107564, Москва, 1-я Мясниковская ул., дом 3, стр. 3
E-mail: andand54@yandex.ru

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, промышленная утилизация, технические изделия, выбор стратегии, поддержка принятия решений, организация, мониторинг

Аннотация: предлагаемый комплекс моделей предназначен для решения взаимосвязанных задач оценки экономической эффективности деятельности по утилизации технических изделий (ТИ) различного назначения, выбора рациональной стратегии ее осуществления, определения основных функциональных характеристик и оптимизации основных параметров организации процесса утилизации ТИ. Он может быть использован в деятельности крупномасштабных организационно-экономических систем (предприятий, корпораций, отраслей промышленности) для поддержки принятия решений по выбору инновационных экономически эффективных и социально значимых направлений промышленной утилизации ТИ, их реализации и мониторингу.

1. Введение

В условиях ускорения темпов технического прогресса, постоянного роста промышленного производства, общего ухудшения экологической обстановки и проведения технической политики ресурсосбережения актуальной социально-экономической проблемой является утилизация технических изделий (ТИ) различного назначения, на решение которой выделяются значительные, все возрастающие, ресурсы. По указанным причинам промышленная утилизация ТИ может рассматриваться в качестве одного из возможных коммерчески привлекательных направлений инновационного развития промышленных корпораций и предприятий. Стратегический характер управленческих решений по выбору направлений развития предприятий и корпораций, значительные объемы инвестиций, необходимых для их осуществления, наличие неопределенности и рисков реализации обусловили разработку настоящего комплекса экономико-математических моделей поддержки принятия решений по промышленной утилизации ТИ различного назначения. Структура разработанного комплекса показана на рис. 1, он включает взаимосвязанные блоки моделей выбора стратегии, экономической оценки,

моделирования процесса промышленной утилизации ТИ различного назначения, а также оптимизации основных параметров ее организации.



Рис. 1. Комплекс экономико-математических моделей утилизации ТИ.

Дадим краткую характеристику структурным элементам рассматриваемого комплекса моделей.

2. Выбор стратегии утилизации ТИ

Под стратегией утилизации в данном случае понимается совокупность направлений и способов утилизации ТИ, организационных, финансовых и нормативно-правовых механизмов их реализации. С математической точки зрения задача выбора стратегии утилизации ТИ может быть охарактеризована как многокритериальная, трудно – или не формализуемая, требующая учета различного рода неопределенностей. Для ее решения предложена модель на основе методов анализа иерархий и аналитических сетей (МАИ/МАС) [1]. Применение метода МАС позволяет при необходимости учитывать все возможные взаимосвязи между элементами задачи, в том числе взаимозависимость критериев. Схема решения задачи (рис. 2) включает иерархически взаимосвязанные модели оценки стратегий: обобщенной, по категориям *Выгоды*, *Издержки* и *Риски*, а также модель определения приоритетов рассматриваемых категорий в составе обобщенного критерия. Частные критерии оценки *Выгод* учитывают положительный эффект от реализации стратегий в различных сферах – экономической, социальной, экологической, национальной безопасности и др. При оценке *Издержек* рассматриваются затраты, связанные с задержкой утилизации ТИ, их безопасным хранением и транспортировкой, разработкой и реализацией технологий утилизации ТИ и др. При оценке *Рисков* учитываются риски разработки и реализации технологий утилизации ТИ, риски нанесения ущерба жизни и здоровью людей (в результате задержки утилизации ТИ и при ее осуществлении), экологические риски и др.

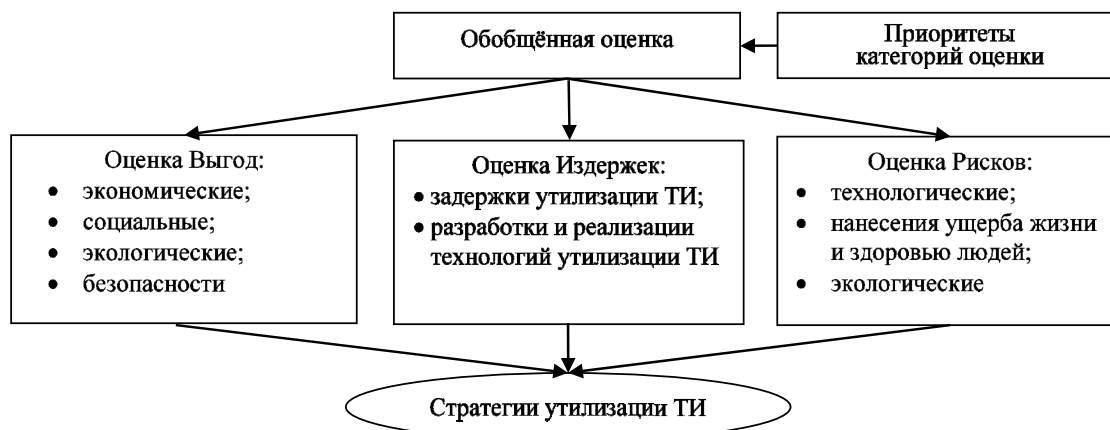


Рис. 2. Схема оценки возможных стратегий утилизации ТИ.

Результаты оценки стратегий утилизации ТИ на условном примере утилизации боеприпасов [2], иллюстрирующем работоспособность предложенной модели, приведены на рис. 3.

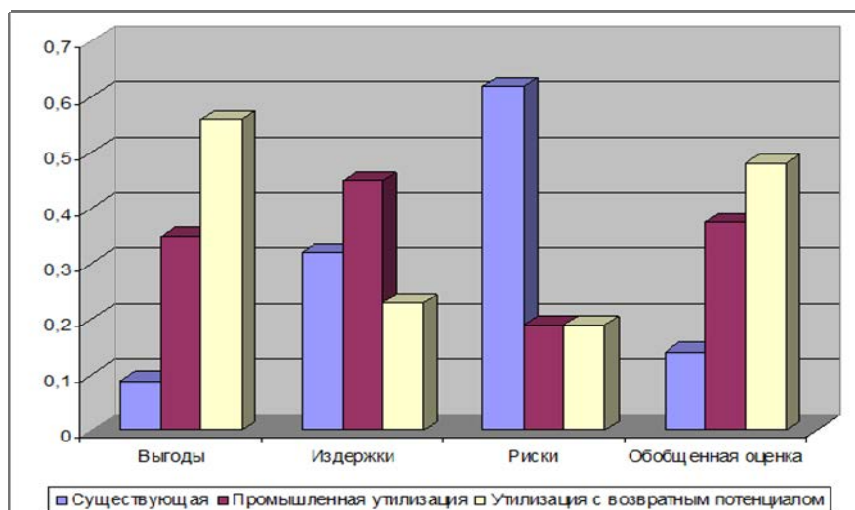


Рис. 3. Результаты оценки стратегий утилизации ТИ (на примере боеприпасов).

Рассматриваемые стратегии имели следующий смысл: *существующая* – хранение, ремонт и уничтожение боеприпасов путем подрыва; *промышленная утилизация* – переработка боеприпасов в изделия народнохозяйственного назначения, вторичное сырье и уничтожение оставшихся; *утилизация с реализацией возвратного потенциала* – повторное использование пригодных боеприпасов и их элементов при производстве новых изделий, утилизация неиспользованных в указанных целях боеприпасов и уничтожение остальных.

3. Экономическая оценка утилизации ТИ

Основу блока составляет *модель оценки экономического эффекта от утилизации ТИ*, согласно которой средний экономический эффект $\mathcal{E}(T)$ от утилизации ТИ в течение

ние периода времени T определяется как разница доходов $D(T)$ от реализации продуктов утилизации и расходов $S(T)$ на ее осуществление:

$$(1) \quad \Delta(T) = D(T) - S(T).$$

Доходы от реализации продукции утилизации за период времени T определяются соотношением:

$$(2) \quad D(T) = d\mu_n T = dc\mu_n T,$$

где d – доход от утилизации одного ТИ; μ_n – суммарная производительность оборудования (интенсивность утилизации ТИ); c – число параллельно работающих комплектов производственного оборудования (технологических линий, производственных участков, рабочих мест), осуществляющих полный цикл операций по утилизации ТИ (далее – численность оборудования); μ – производительность одного комплекта оборудования.

Суммарные расходы на осуществление утилизации ТИ в течение периода времени T в общем случае включают затраты на разработку, закупку (производство) и эксплуатацию производственного оборудования, а также текущие расходы:

$$(3) \quad S(T) = S_{\text{НИОКР}} + S_{\text{ПМ}}c + (S_{\text{Э}}c + S_{\text{ОБС}}\mu_n)T,$$

где $S_{\text{НИОКР}}$ – стоимость НИОКР в обеспечение разработки производственного оборудования и организации утилизации ТИ, перенесенная на рассматриваемый период T ; $S_{\text{ПМ}}$ – стоимость комплекта производственного оборудования, перенесенная на рассматриваемый период T ; $S_{\text{Э}}$ – стоимость эксплуатации комплекта производственного оборудования в единицу времени; $S_{\text{ОБС}}$ – текущие расходы на обеспечение утилизации одного ТИ (оплата труда персонала, стоимость расходных материалов, электроэнергии и др.).

Наряду с определением экономического эффекта от утилизации ТИ модель позволяет получить условия экономической эффективности утилизации ТИ, которые представляют собой аналитические зависимости, определяющие потребные для получения положительного экономического эффекта, а также обеспечения окупаемости расходов на утилизацию в заданный срок значения основных внешних и внутренних параметров: потребных численности подлежащих утилизации ТИ, численности и производительности оборудования, величины доходов от утилизации ТИ, периода времени осуществления утилизации.

Так например, из формул (1-3) следует, что срок окупаемости расходов T_0 определится выражением:

$$T_0 = \frac{S_{\text{НИОКР}} + S_{\text{ПМ}}c}{\mu_n(d - S_{\text{ОБС}}) - S_{\text{Э}}c}.$$

Получаемые в данном блоке экономические показатели, стоимостные и другие характеристики могут использоваться также в качестве исходных данных в блоках моделирования процесса утилизации и оптимизации параметров процесса утилизации ТИ.

4. Моделирование процесса утилизации ТИ

Универсальная аналитическая модель процесса утилизации ТИ (рис. 4) на основе современных методов теории систем массового обслуживания (СМО) [3] позволяет определять вероятностные и основные функциональные характеристики процесса утилизации ТИ: вероятность нахождения на предприятии ровно n ТИ, вероятность

принятия ТИ на утилизацию, средние численность и время нахождения ТИ на предприятии и в его подразделениях, среднюю численность занятого оборудования, коэффициент использования оборудования.

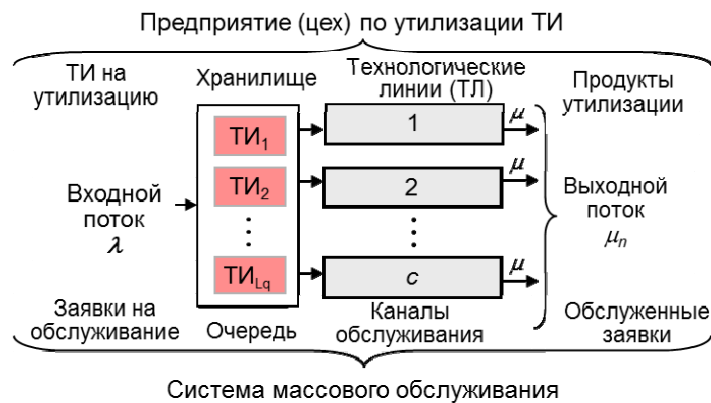


Рис. 4. Универсальная модель утилизации ТИ на основе теории СМО.

В рассматриваемой модели предприятие (цех) по утилизации ТИ представляется как система массового обслуживания, основными элементами которой являются хранилище утилизируемых ТИ (в терминах СМО – очередь) и, в зависимости от масштабов и организации производства, параллельно работающие технологические линии, производственные участки, рабочие места, осуществляющие операции по утилизации ТИ (каналы обслуживания), в количестве c . Подлежащие утилизации ТИ поступают в хранилище (очередь) с интенсивностью λ штук в единицу времени. Ожидающее в очереди ТИ далее направляется для проведения работ в первый освободившийся канал обслуживания. Все каналы обслуживания являются идентичными, агрегированная интенсивность выполнения операций по утилизации каждым из них равна μ штук в единицу времени. Число ТИ, находящихся в системе обслуживания, включает уже обслуживаемые (утилизируемые) изделия, а также изделия, находящиеся в очереди (хранилище). Выходной поток СМО, состоящий из продуктов утилизации ТИ, характеризуется интенсивностью обслуживания заявок (проведения работ по утилизации ТИ) μ_n , которая определяется числом каналов обслуживания c , интенсивностью обслуживания каждым каналом μ , а для некоторых типов СМО также количеством заявок n , находящихся в СМО (например, при конечной емкости системы обслуживания и бесконечной емкости источника заявок). Универсальность модели достигается за счет применения для формализованного описания процесса утилизации ТИ различных типов аналитических моделей СМО (в соответствии с их международной классификацией) исходя из вида изделия, условий осуществления и содержания процесса утилизации, а также задач исследований, в соответствии с разработанными рекомендациями. Используемая для применения модели международная классификация СМО и формулы для расчета функциональных характеристик приведены в работе [3].

В случаях, когда применение аналитических моделей на основе СМО некорректно, может использоваться *обобщенная имитационная модель процесса утилизации ТИ* (рис. 5), построенная при помощи высокоуровневых средств дискретно-событийного моделирования систем массового обслуживания из состава библиотеки Enterprise Library системы имитационного моделирования AnyLogic (разработчик XJ Technologies Company Ltd) [4, 5]. Данная имитационная модель позволяет получать все перечисленные выше функциональные характеристики процесса утилизации ТИ, определяемые

при помощи аналитической модели, а также ряд статистических характеристик процесса утилизации ТИ.

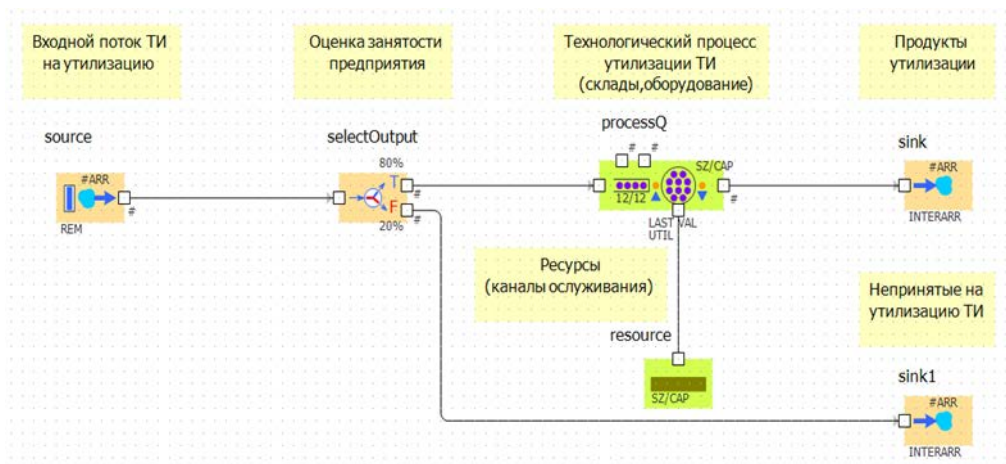


Рис. 5. Структура обобщенной имитационной модели утилизации ТИ.

Сравнение данной имитационной модели с аналогичной по назначению универсальной аналитической моделью (рис. 4) свидетельствует о высокой степени схожести результатов. Полученная зависимость точности результатов имитационного моделирования от времени (рис. 6) подтверждает возможность достижения высокой точности при приемлемом времени моделирования.

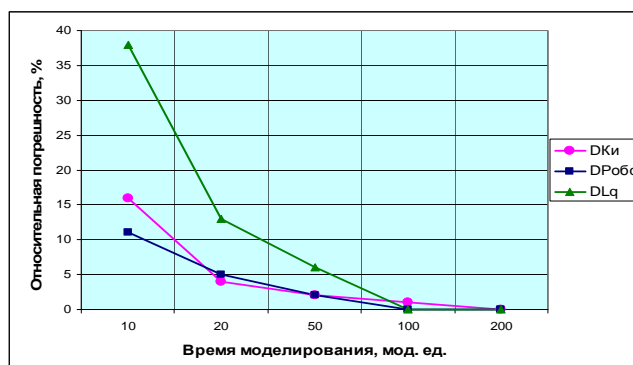


Рис. 6. Точность имитационной модели относительно аналитической модели (СМО).

Основным преимуществом имитационных моделей по сравнению с аналитическими является возможность описания сложных технологических процессов, реализующих различные способы утилизации ТИ, с любой требуемой степенью детализации. В качестве возможных способов утилизации объектов рассматриваются:

- повторное (вторичное) применение объектов в хозяйстве;
- переоборудование объекта с применением по тому же или иному функциональному назначению в хозяйственных целях;
- демонтаж объекта, создание новых изделий (из частей) для хозяйственных целей;
- демонтаж объекта и применение его составных частей в хозяйственных целях;
- переработка всего объекта в виде отходов во вторичное сырье.

На рис. 7 показана *многоэтапная имитационная модель утилизации ТИ*, обеспечивающая описание перечисленных выше возможных способов утилизации ТИ и соответствующих работ применительно к трем уровням разукрупнения ТИ: изделие в целом, составные части, материалы (вторичное сырье).

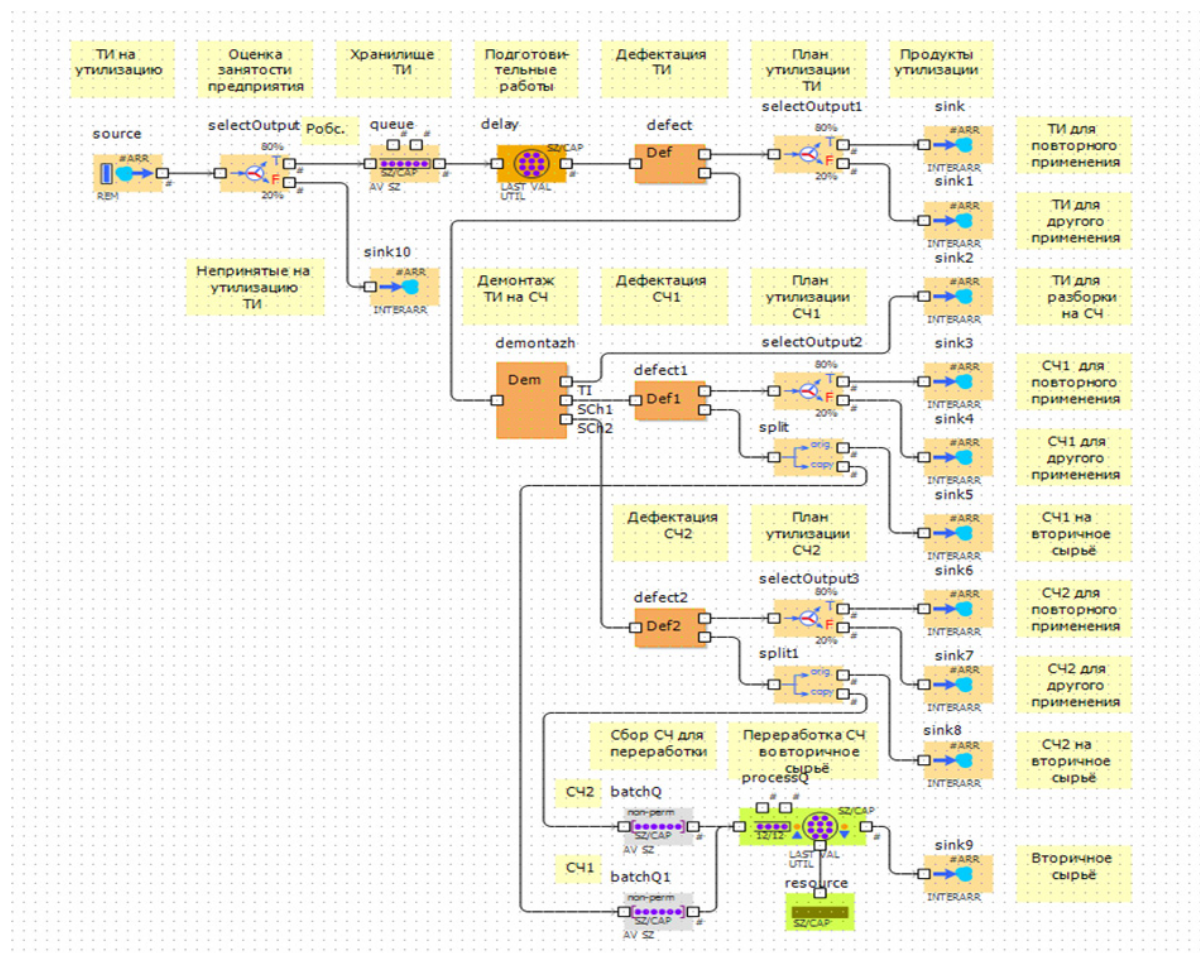


Рис. 7. Структура многоэтапной имитационной модели утилизации ТИ.

Модель описывает следующие виды работ:

- поступление ТИ на предприятие по утилизации (блок source);
- оценку занятости предприятия и исходя из этого возможности принятия ТИ на утилизацию (блок selectOutput);
- нахождение ТИ в хранилище в ожидании начала утилизации (блок queue);
- проведение работ по подготовке ТИ к утилизации (блок delay);
- дефектацию ТИ, в ходе которой исправные изделия отделяются от неисправных (блок defect);
- демонтаж (разукрупнение) ТИ на составные части СЧ1, СЧ2 (блок demontazh);
- дефектацию составных частей (блоки defect1, defect2);
- определение количества однотипных составных частей, получаемых при демонтаже одного ТИ (блоки split1, split2);
- сбор однотипных составных частей в партии для дальнейшей переработки во вторичное сырье (блоки batchQ, batchQ1);
- переработку составных частей во вторичное сырье (блоки processQ, resource).

Модель включает как стандартные блоки из состава библиотеки Enterprise Library (source, selectOutput, queue, delay, split, batchQ, processQ, resource, sink), так и специально разработанные для данной модели укрупненные функциональные блоки: блоки дефектации ТИ, СЧ1, СЧ2 (defect, defect1, defect2), а также блок демонтажа ТИ (demontazh), собранные из стандартных блоков библиотеки.

Описанная многоэтапная модель (рис. 7) позволяет определять основные функциональные характеристики процесса утилизации ТИ как для процесса в целом, так и для отдельных этапов (операций), а также статистические характеристики каждого из блоков модели (аналогично рассмотренной выше обобщенной имитационной модели утилизации ТИ).

На рис. 8 показаны полученные на данной модели зависимости длины очереди на различных участках работ: подготовки ТИ к утилизации, дефектации ТИ, демонтажа ТИ, переработки СЧ от интенсивности потока заявок. Из него следует, что «узкими местами» рассматриваемой одноканальной схемы обслуживания являются участки дефектации ТИ и подготовки ТИ к утилизации, им соответствуют наибольшие очереди. В этих условиях увеличение числа каналов обслуживания на участке подготовки ТИ к утилизации с 1 до 2 приводит к существенному возрастанию вероятности обслуживания (рис. 9).

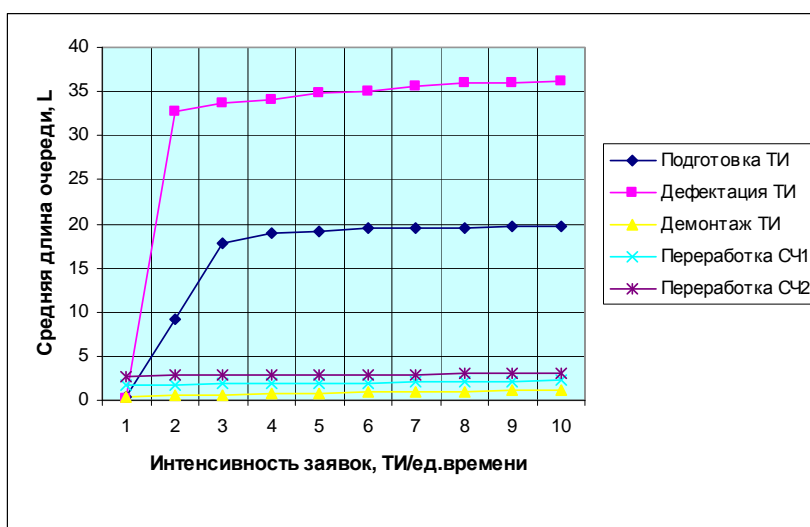


Рис. 8. Зависимость средней длины очереди от интенсивности заявок.

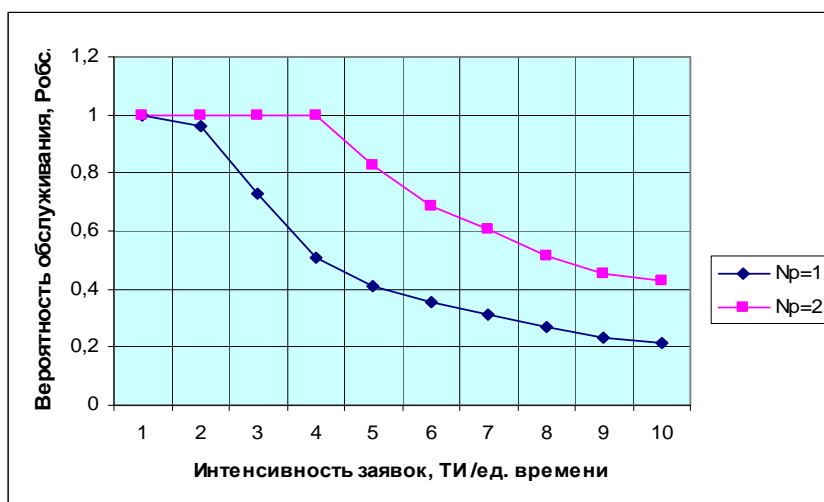


Рис. 9. Зависимость вероятности обслуживания заявок от их интенсивности при увеличении числа каналов на участке подготовки ТИ к утилизации

В целом рассмотренные выше модели анализа процесса утилизации ТИ могут явиться действенным инструментом поддержки принятия эффективных управленческих решений по рациональной организации и совершенствованию реализации промышленной утилизации ТИ различного назначения на предприятиях и в корпорациях.

5. Оптимизация основных параметров организации утилизации ТИ

Модель оптимизации параметров оборудования для утилизации ТИ по критерию минимума суммарных затрат показана на рис. 10. Она основана на стоимостной модели системы обслуживания [3] и предназначена для определения оптимального значения параметров производственного оборудования u_{opt} (численности c_{opt} , производительности μ_{opt}), исходя из условия минимума суммарных затрат на осуществление утилизации $S_{\Sigma}(u)$, включающих затраты на утилизацию $S_Y(u)$ и потери $S_{II}(u)$, связанные с задержкой утилизации ТИ, в единицу времени:

$$S_{\Sigma}(u) = S_Y(u) + S_{II}(u) \rightarrow \min.$$

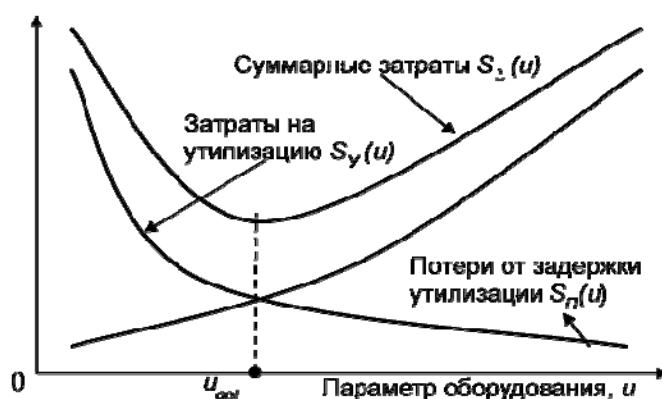


Рис. 10. Оптимизация параметров производственного оборудования по критерию минимума суммарных затрат.

Наличие минимума суммарных затрат обусловлено тем, что с ростом параметров c и μ затраты на утилизацию увеличиваются, а потери от задержки утилизации уменьшаются. Модель позволяет решать задачу максимально экономной организации процесса утилизации ТИ на предприятии. Возможности применения данной модели для решения задач оптимизации численности производственного оборудования для утилизации ТИ и выбора оборудования с оптимальной производительностью методом линейного программирования показаны в статье [6].

Модель оптимизации параметров оборудования для утилизации ТИ по критерию максимума экономического эффекта (рис. 11) позволяет определять оптимальные значения параметров производственного оборудования u_{opt} (численности c_{opt} , производительности μ_{opt}), исходя из условия максимума экономического эффекта $\mathcal{E}(u)$ с учетом получаемого дохода $D(u)$ и суммарных затрат $S_{\Sigma}(u)$ на утилизацию ТИ в единицу времени:

$$\mathcal{E}(u) = D(u) - S_{\Sigma}(u) \rightarrow \max.$$

Из графика на рис. 11 видно, что положительный экономический эффект $\mathcal{E}(u)$ достигается в интервале (α, β) значений параметра u , внутри которого существует оптимальное значение u_{opt} , соответствующее максимальному значению $\mathcal{E}(u)$. При $u < \alpha$ доход от утилизации $D(u)$ меньше суммарных затрат $S_{\Sigma}(u)$ вследствие недостаточных темпов утилизации ТИ, ограниченных параметрами оборудования. При $u > \beta$

суммарные затраты $S_{\Sigma}(u)$ превышают доходы $D(u)$ из-за избыточности параметров производственного оборудования.

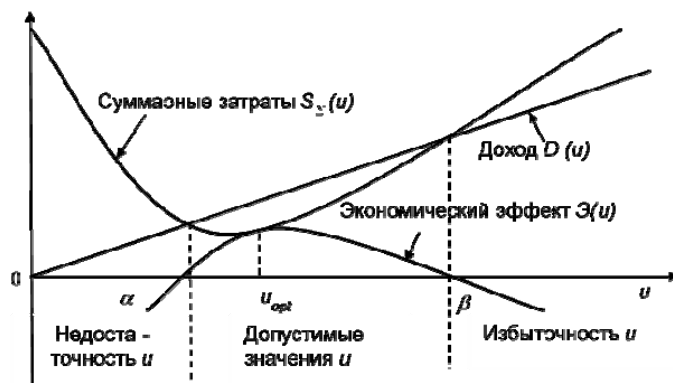


Рис. 11. Оптимизация параметров производственного оборудования по критерию максимума экономического эффекта от утилизации ТИ.

Модель оптимизации параметров процесса утилизации технических изделий на основе заданных уровней функциональных характеристик (рис. 12) построена на основе модели предпочтительного уровня обслуживания [3] и позволяет определить оптимальные параметры производственного оборудования u_{opt} (численности c_{opt} , производительности μ_{opt}) для утилизации ТИ в случае, когда определяющими факторами являются не стоимостные показатели, а конкурирующие функциональные характеристики процесса утилизации, например, время пребывания ТИ на предприятии W_S и коэффициент простоя оборудования K_{II} . При увеличении параметра u значение первого из них уменьшается а второго – уменьшается. В качестве оптимального принимается значение u_{opt} в интервале Δu , удовлетворяющее условиям:

$$(4) \quad \begin{cases} W_S(u) \leq \alpha, \\ K_{II}(u) \leq \beta, \end{cases}$$

где α, β – заданные предпочтительные уровни значений W_S и K_{II} , соответственно.

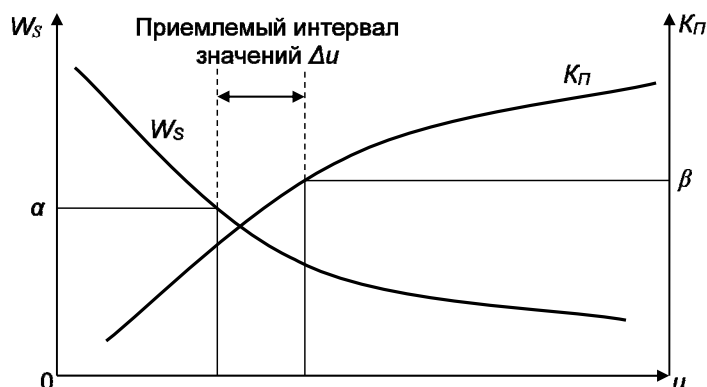


Рис. 12. Оптимизация численности оборудования на основе предпочтительных уровней параметров W_S и K_{II} .

С использованием данной модели проведены параметрические расчеты по определению зависимости оптимальной численности производственного оборудования c от

потребностей в утилизации ТИ (λ) и производительности единицы оборудования μ [6]. Расчеты параметров W_S и K_{II} проведены при помощи универсальной модели утилизации ТИ на основе теории СМО (рис. 4).

Обобщенная имитационная модель оптимизации параметров процесса утилизации ТИ построена с использованием оптимизатора OptQuest [4, 5], встроенного в среду моделирования AnyLogic. Она позволяет определять оптимальные параметры производственного оборудования и емкость хранилища применительно к процессу утилизации, описываемому обобщенной имитационной моделью промышленной утилизации ТИ (рис. 5). В качестве целевой функции (рис.13) рассматривается прибыль от утилизации ТИ, получаемая в единицу времени, определяемая как разница доходов от реализации продуктов утилизации и расходов на ее осуществление с учетом упущенной выгоды за отказ в утилизации ТИ. Расходы могут включать затраты на разработку, закупку и эксплуатацию производственного оборудования, текущие расходы (оплата труда персонала, стоимость расходных материалов, электроэнергия) и др.



Рис. 13. Вид целевой функции задачи оптимизации параметров процесса утилизации ТИ в среде моделирования AnyLogic.

На рис. 14 показаны результаты серии компьютерных экспериментов с моделью по решению оптимизационных задач определения экономически целесообразного числа каналов обслуживания (N_{opt}) для различных значений интенсивности заявок на утилизацию ТИ.

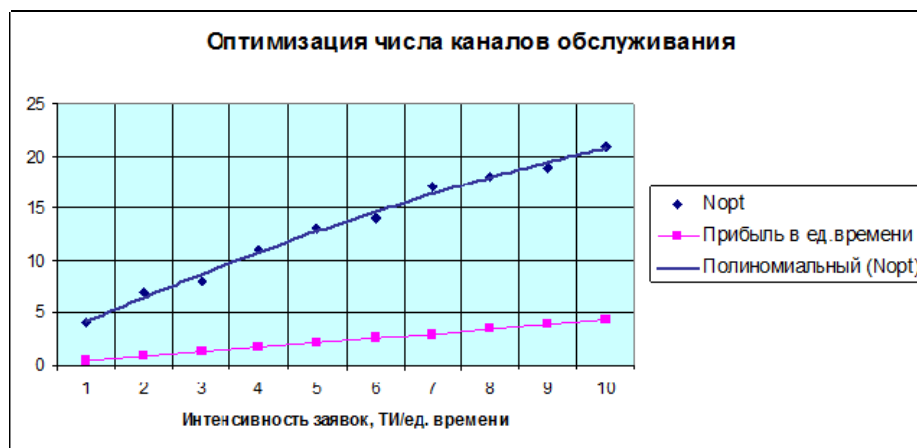


Рис. 14. Оптимальные значения числа каналов обслуживания для различных интенсивностей заявок на утилизацию ТИ.

6. Заключение

Рассмотренный комплекс экономико-математических моделей может использоваться в процессе управления деятельностью промышленных корпораций и предпри-

ятий в качестве инструмента поддержки принятия эффективных управленческих решений по вопросам:

- оценки экономической целесообразности выбора деятельности по промышленной утилизации технических изделий различного назначения;
- выбора рациональной стратегии осуществления промышленной утилизации ТИ предприятиями и корпорациями;
- разработки и оценки инновационных проектов в сфере утилизации ТИ;
- определения оптимальных параметров организации промышленной утилизации ТИ на предприятиях: численности и производительности оборудования, емкости хранилищ, а также показателей загрузки оборудования, временных, вероятностных и других характеристик процесса;
- определения требований к производительности производственного оборудования для утилизации ТИ при задании его в разработку (формировании технического задания на ОКР);
- мониторинга и анализа уже осуществляемой на предприятиях деятельности по утилизации ТИ и повышения ее экономической эффективности.

Работа начата при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (09-06-13512-офи ц) и продолжена в инициативном порядке.

Список литературы

1. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 360 с.
2. Васильев С.В., Андреев А.Ю. Актуальные вопросы выбора и реализации рациональной стратегии утилизации боеприпасов // Вооружение. Политика. Конверсия. 2011. № 6 (102). С. 7-13.
3. Таха Х.А. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
4. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 400 с.
5. AnyLogicTM: Руководство пользователя. <http://www.xjtek.com/>.
6. Андреев А.Ю., Петров Е.А. Оптимизация параметров оборудования для промышленной утилизации технических изделий // Компетентность. 2010. № 1. С. 28-35.