



**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУМАРКОВСКОЙ
МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПАРАМЕТРОВ МЕХАНОСБОРОЧНОГО
ПРОИЗВОДСТВА С УЧЕТОМ
РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОТКАЗОВ**

✉¹**Рапацкий Юрий Леонидович**
директор Центра оценки качества образова-
ния, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Строи-
тельство и землеустройство», доцент кафед-
ры «Приборные системы и автоматизация
технологических процессов»
ФГАОУ ВО «Севастопольский государ-
ственный университет», г. Севастополь, (РФ)
e-mail: u.l.rapatskiy@mail.ru

Липка Виктория Михайловна
аспирант кафедры «Технология машиностро-
ения», старший преподаватель кафедры
«Строительство и землеустройство» ФГАОУ
ВО «Севастопольский государственный уни-
верситет» (РФ)

Аннотация.
Предлагается методика исследования произво-
дительности и надежности технологических
процессов механосборочного производства на
этапах жизненного цикла изделий машиностро-
ения. Предлагается полумарковская матема-
тическая модель, позволяющая анализировать,
например, технологические процессы изготов-
ления резьбовых соединений. В предлагаемой
модели определяются функции распределения
(ФР) времени обслуживания единицы продук-
ции с учетом отказов. ФР позволяют обеспечить
информационную согласованность моделей
различных иерархических уровней и исследо-
вать взаимосвязь этапов жизненного цикла из-
делий машиностроения.

Ключевые слова: ПОЛУМАРКОВСКАЯ
МОДЕЛЬ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ, ЭТАПЫ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА.

¹Автор для ведения переписки

**APPLICATION OF THE SEMI-MARKOV
MODEL FOR INVESTIGATION THE
PARAMETERS OF MECHANICAL
ASSEMBLY PRODUCTION TAKING
INTO ACCOUNT DIFFERENT TYPES OF
FAILURES**

✉¹**Rapatskiy Yuri Leonidovich**
director of the Center for assessment of the
quality of education, ph.d., associate professor,
head of the Department of Construction and
Land Management, Associate Professor of the
Department of Instrument Systems and Auto-
mation of Technological Processes FGAOU
VO «Sevastopol State University» Sevastopol
(RF) e-mail: u.l.rapatskiy@mail.ru

Lipka Victoria Mikhailovna
postgraduate student of the Department of Me-
chanical Engineering, Senior Lecturer of the
Department of Construction and Land Man-
agement, Sevastopol State University (RF)

Annotation.
A technique is proposed for studying the produc-
tivity and reliability of technological processes of
mechanical assembly production at the stages of
the life cycle of mechanical engineering products.
A semi-Markov mathematical model is proposed
that makes it possible to analyze, for example, the
technological processes of manufacturing threaded
connections. In the proposed model, the distribu-
tion functions (DF) of the service time of a unit of
production are determined, taking into account
failures. FDs make it possible to ensure informa-
tional consistency of models of various hierar-
chical levels and to study the relationship between
the stages of the life cycle of mechanical engineer-
ing products.

Key words: SEMI-MARKOV MODEL,
TECHNOLOGICAL HERITAGE, LIFE
CYCLE STAGES.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Механосборочное производство является одной из основных подсистем предприятий машиностроения, в т. ч. автомобилестроения, станкостроения, а также авиастроения. На протяжении этапов жизненного цикла (ЖЦ) над изделиями машиностроения (ИМ) осуществляются технологические воздействия по изготовлению, ремонту, восстановлению в соответствии с регламентированными технологическими процессами (ТП), которые должны учитывать технологическую наследственность операций. Определение влияния предыдущих операций (технологий, этапов) на последующие (операции, технологии, этапы) может быть реализовано в нескольких направлениях, в том числе, тогда, когда связь между ними может асинхронной, не связанной с непосредственным взаимодействием [1-4]. В этом случае возникает проблема определения технологической наследственности отдельных технологических процессов по их производительности, надежности и качества выпускаемой продукции, что отражено в работах [1-4]. Проблема заключается в достоверном определении влияния на качество продукции технологической наследственности, которое без учета различных форм передачи информации между операциями не позволяет обеспечить высокое качество продукции [1, 3-6], начиная с влияния металлургической наследственности [7]. Во всех работах, посвященных этой теме, оценка качества ИМ основана на принципе аддитивности и, к сожалению, не учитывает стохастический фактор влияния технологической наследственности, что не позволяет обеспечить требуемую достоверность этого влияния. Кроме того, необходимо учитывать совместное влияние факторов, т. к. оно, может быть, соразмерно влияниям отдельно взятых факторов [3]. В том числе это относится, во-первых, к процессам технологического воздействия на отдельные детали и на ИМ в целом, которые необходимо учитывать как совокупно взаимовлияющие процессы формирования технологической наследственности. Во-вторых, это относится к различным свойствам и показателям качества ИМ, обусловленных множеством связей технологических и др. факторов обеспечения качества ИМ. Для предотвращения различных потерь: финансовых, качества ИМ, репутации изготовителя, – необходима высокая точность оценки влияния каждого фактора и их совокупности. Оценка такого влияния должна учитывать все этапы ЖЦ – от проектирования ИМ до сборки проходя этапы подготовки производства и изготовления деталей. Неполный учет показателей качества может быть причиной неудовлетворительного проектирования и использования технологических процессов [4] вследствие ухудшения других показателей качества [3].

Таким образом, большинство существующих математических моделей механосборочного производства недостаточно адекватно описывают происходящие в нем стохастические процессы. В машиностроении и ряде других производственных отраслей создание конкурентоспособной продукции во многих случаях возможно только на основе комплексного анализа этапов ее ЖЦ и их взаимосвязей. Это позволит адекватно определить важнейшие технологические параметры, определяющие экономическую эффективность, и с высокой достоверностью оценить её величину, что важно для принятия решений при модернизации производства. Для этого необходима разработка научных и методологических положений, учитывающих стохастический аспект технологических процессов, в том числе, в механосборочных процессах. Учет стохастичности процессов должен включать в себя помимо случайных величин времени технологических переходов еще и различные отказы технологической процесса. Это позволит предотвратить снижение качества изделий машиностроения и падение производительности [8, 9]. При этом к отказам ТП будем относить как неисправности технологического оборудования, так и превышение допустимых величин параметров свойств изделий, включая заготовки и детали [8].

Необходимым этапом ЖЦ ИМ является разработка технологии изготовления изделий, состоящей из отдельных операций, связь между которыми проявляется в виде технологической наследственности. Анализ публикаций, в т. ч. [8-15], показал высокую эффективность применения для моделирования и исследования ТП механосборочного производства полу-

марковских математических моделей (ПММ). Главным преимуществом ПММ является возможность учета последствия, проявляющегося на этапах ЖЦ в виде технологической наследственности. Такие модели позволяют определить производительность с учетом надежности функционирования ТП и обслуживающих устройств (ОУ). В ПММ в качестве ОУ могут рассматриваться производственные модули (станки, обрабатывающие центры, а также технологические ячейки (ТЯ) и сборочные центры). Математические модели ОУ позволяют проведение математического моделирования производственной системы, в том числе, и определение производительности технологической системы, характерным параметром которой является время одного цикла обслуживания единицы продукции. Обслуживанием будем считать технологические воздействия на заготовку, осуществляемые на станках и другом технологическом оборудовании, а также операции сборки ИМ из деталей и узлов. Время наработки на отказ, время восстановления и время обслуживания при этом являются стохастическими случайными величинами (СВ). Исходными и выходными данными для ПММ являются функции распределения (ФР), соответствующих СВ. Структура и применение ПММ, в т.ч. для рассматриваемых классов технологических систем, рассмотрены в публикациях [8, 9, 13-17].

В качестве примера рассматривается производство, включающее изготовление деталей с резьбой, а также сборку изделий с применением резьбовых соединений с метрической резьбой размером от М6 до М20, имеющих шаг резьбы от 1,0 мм до 2,5 мм. Объем данных резьбовых соединений деталей от общего объема средств соединений будем считать равным не более 70 % [5, 9]. Отказом как потерей качества ИМ будем считать раскрытие стыка соединяемых деталей при эксплуатации РС [9, 18].

Цель исследования включает, во-первых, разработку полумарковской математической модели технологических процессов сборочного производства при отказах разного вида для изучения надежности и производительности и, во-вторых, методику формирования исходных данных для моделирования функций распределения времени обслуживания, наработки на отказ и восстановления.

2 Материалы и методы

Обеспечение стабильного высокого качества изготовления в массовом и серийном производстве резьбовых деталей (РД) путем накатывания роликами с высокой производительностью и минимальными затратами представляет сложную задачу, которая до сих пор в полной мере не решена [19-22]. Качество РД, имеющих наружную резьбу (НР), отличается нестабильностью вследствие релаксации нагрузочных напряжений в РД, приводящей к разрушению, ослаблению стягивания стыков, их раскрытию и, в конечном счете, к отказам ИМ. Это обусловлено тем, что сила затяжки РС и получаемые зазоры являются случайными величинами, и разброс их значений должен учитываться в расчетах посадок [19, 20].

Известно, что качество резьбовых поверхностей в наибольшей степени определяется резьбонакатыванием и технологической наследственностью предыдущих операций, прежде всего, токарной и шлифовальной [19-21]. В свою очередь, операция резьбонакатывания определяется состоянием роликов, накатывающих резьбу (РР), а именно, их точностью размеров, отклонением формы и износом. Это означает, что надежность роликов определяется их износостойкостью, обеспечивающей требуемую стандартом точность резьбы, при накатывании резьбы для максимального количества деталей [23].

Преимуществом метода получения резьбы накатыванием роликами является высокая производительность. Однако недостатками этого процесса являются особенности, заключающиеся в определенной вероятности возникновения скрытых дефектов и микротрещин в резьбе и не позволяющие проводить сплошной технический контроль качества резьбовой поверхности обычными средствами. Скрытые дефекты резьбы могут приводить к опасным ситуациям при сборке ИМ и в их эксплуатации. Все это определяет важную технологическую проблему, заключающуюся в сохранении высокой производительности резьбонакаты-

вания при одновременном предотвращении возникновения дефектов резьбы, чему посвящено множество публикаций, в том числе [8, 19, 20, 22, 24]. В частности, одним из эффективных способов предотвращения возникновения дефектов из-за исчерпания запаса пластичности скрытых микротрещин в РД с НР, как показали выполненные авторами эксперименты и конечно-элементное моделирование, является ограничение времени резбонакатывания и количества циклов деформирования.

Анализ отказов ТП резбонакатывания представлен в работах [9, 19, 24]. Для исследования качества резьбовых деталей в ходе производственных испытаний авторами определялись параметры роликов и деталей с наружной резьбой (геометрические и точностные) для трех партий объемом более 10000 штук с резьбами М10, М8, М6. Были определены причины и последствия отказов, времена безотказной работы и восстановления.

Исследования стойкости РР [9] показали отличие экспериментальных (производственных) результатов от расчетных значений в некотором ряде случаев [19, 24]. Также имело место наличие необратимых повреждений РР в виде смятия, сколов и выкрашивания для случаев завышенных диаметров заготовок и их твердости. При отсутствии сплошного контроля поврежденные ролики накатывали бракованную резьбу до тех пор, пока это не обнаружится [8].

Построение адекватной модели ТП резбонакатывания требует рассмотрения всех влияющих факторов с последующим определением существенных. Общее же количество важных факторов достаточно велико и включает в себя группы факторов геометрической точности заготовки и системы «станок-приспособление_инструмент-деталь», физико-механических свойств, параметров резбонакатных роликов и их статистические характеристики [8, 22, 23].

Для упрощения дальнейших расчетов было произведено укрупнение состояний графа, приведенного в работе [9] для выявления преобладающих отказов, оказывающих наибольшее влияние на результат технологического процесса накатывания резьбы. Времена безотказной работы и восстановления РД для четырех преобладающих отказов ТП резбонакатывания приведены в форме вариационных рядов (табл. 1).

Гистограмма и полигон для отказов первого вида показаны, соответственно, на рисунке 1, *a* для СВ времени безотказной работы и на рисунке 1, *б* – для времени восстановления.

Аналогичный вид имеют полигоны и гистограммы для отказов второго, третьего, четвертого видов. Экспериментальные распределения СВ приведены к виду обобщенного закона Эрланга второго и более порядка, для чего использовалась методика аппарата нейронных сетей [25]. Соответствие экспериментальных распределений СВ закону Эрланга второго порядка оценивалось по классическому критерию χ -квадрат.

Математические ожидания времени восстановления и безотказной работы элементов технологических процессов накатывания резьбы (функциональных компонентов оборудования и параметров деталей) приведены в таблице 2.

Анализ экспериментальных результатов дает возможность определить исходные данные для предлагаемой ПММ и с её помощью исследовать производительность и надежность технологических процессов сборки ИМ.

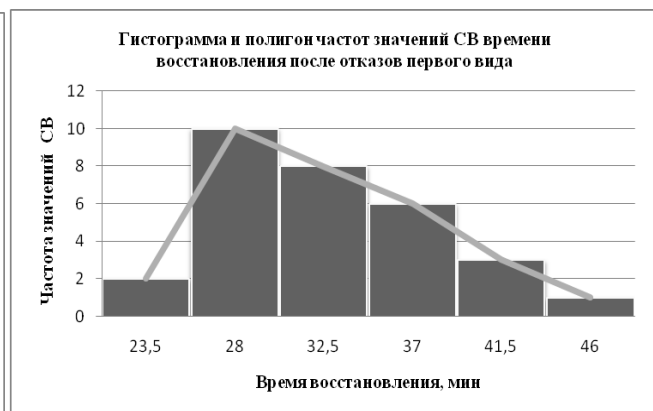
При построении модели ПММ предполагалось, что обслуживание продукции прерывается после отказа в процессе выполнения ТП и после восстановления с учетом времени восстановления – продолжается [18, 26]. Таким образом, отказы будем принимать необесцениваемыми [18].

Рассмотрим технологический процесс, описанный в работах [10, 18, 27] (табл. 3). Предположим, что случайные величины являются независимыми, при этом имеющими конечные математические ожидания и дисперсии. Найдем их значения, а также функцию распределения $F_{\theta}(t)$ времени цикла обслуживания единицы продукции θ и производительность технологического процесса.

Функционирование реализуемого технологического процесса будем описывать марковским процессом восстановления (ПМВ) $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ и соответствующим ему полумарковским процессом (ПМП) $\xi(t)$ [10, 14, 27] с учетом состояний (табл. 4).

Таблица 1 – Показатели надежности (время безотказной работы и время восстановления) для четырех видов преобладающих отказов ТП резьбонакатывания

№	Наименование, характер преобладающих отказов ТП резьбонакатывания	Вариационные ряды экспериментальных значений									
		времени безотказной работы, мин									
1	Недопустимая погрешность установки заготовок	32	55	63	74	75	82	82	84	86	86
		88	89	95	98	105	109	112	113	115	121
		123	131	137	139	143	145	153	165	181	212
		восстановления, мин									
		19	21	24	24	24	25	25	26	26	27
		27	27	29	29	29	30	30	31	31	32
		33	33	34	35	35	36	41	41	42	46
2	Неравномерность свойств заготовки (твердости и пластичности), отклонения (недопустимые) формы и размеров фаски на заготовках	безотказной работы, мин									
		598	607	748	753	814	838	933	951	974	986
		997	1028	1042	1059	1084	1105	1131	1154	1181	1195
		восстановления, мин									
		198	214	225	229	237	239	241	241	244	249
		252	263	279	283	288	297	306	309	318	323
3	Возникновение микротрещин в РД	безотказной работы, мин									
		207	318	359	471	511	530	545	565	573	582
		587	594	601	614	627	641	684	701	727	739
		восстановления, мин									
		89	95	104	109	114	122	129	133	139	142
4	Недопустимый износ и повреждение резьбонакатных роликов	143	379	455	778	994	1009	1124	1157	1459	1671
		1885	1904	1950	1972	1996	2013	2029	2157	2561	2698
		восстановления, мин									
		229	235	247	258	265	279	282	305	314	321
		323	325	343	351	354	358	359	367	369	395



а – гистограмма и полигон для СВ времени безотказной работы;
б – гистограмма и полигон для СВ времени восстановления
 Рисунок 1 – Гистограммы и полигоны для отказов первого вида

Таблица 2 – Математические ожидания времен восстановления и безотказной работы элементов ТП, ч

Математическое ожидание	Наименование и характер отказов			
	1 Превышенная погрешность установки заготовки	2 Неравномерное распределение пластичности и твердости заготовок, превышенные отклонения размеров фаски и формы заготовки	3 Наличие микротрещин в РД	4 Превышенный износ и повреждение роликов
среднего времени безотказной работы	1,825	16,7	9,12	33,35
среднего времени восстановления	0,51	4,04	2,02	5,02

Таблица 3 – Функции распределения трех случайных величин ТП

Название случайной величины (СВ)	Обозначение	Функция распределения (ФР)	Обозначение плотности распределения СВ
Время обслуживания единицы продукции	α_1	$F_1(t) = P\{\alpha_1 \leq t\}$	$f_1(t)$
Время безотказной работы	α_2	$F_2(t) = P\{\alpha_2 \leq t\}$	$f_1(t)$
Время восстановления после i -го отказа	β_i	$G_i(t) = P\{\beta_i \leq t\}$	$g_i(t)$

Таблица 4 – Состояния ПМВ и ПМП

Обозначение состояния	Состояние	Временная характеристика
10x	ТП работоспособен, началось обслуживание очередной единицы продукции	время, оставшееся до отказа ТП, равно $x \geq 0$;
11x	мгновенное состояние, соответствующее моменту окончания обслуживания единицы продукции	время, оставшееся до отказа ТП, равно $x \geq 0$;
20x	произошло восстановление работоспособности ТП и продолжено прерванное обслуживание единицы продукции	время, оставшееся до окончания прерванного обслуживания, равно $x \geq 0$;
21ix	произошел i -й отказ ТП, обслуживание единицы продукции прервано	время, оставшееся до окончания прерванного обслуживания, равно $x \geq 0$.

Временная диаграмма функционирования рассматриваемой системы с состояниями согласно табл.4, приведенная в работе [18], соответствует графу переходов (рис. 2).

Фазовое пространство состояний (ФПС) системы представляет собой вид:

$$E = \{10x, 11x, 20x, 21ix\}. \quad (2)$$

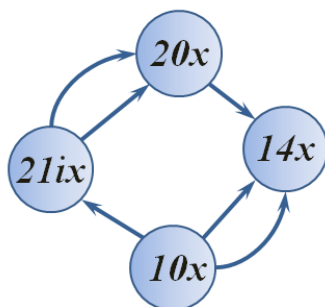


Рисунок 2 – Граф переходов технологического процесса

Полумарковское ядро $Q(t, x, B)$ марковского процесса восстановления $\{\xi_n, \theta_n, n \geq 0\}$ в дифференциальной форме [10] запишется:

$$Q(t, 10x, 11dy) = f_1(x - y) \cdot 1_{x-y}(t)dy, \quad 0 < y < x, \quad (3)$$

где $1_{x-y}(t)$ – единичное распределение в точке.

$$\begin{aligned} Q(t, 10x, 21idy) &= p_i f_2(x + y) \cdot 1_x(t)dy, \quad y > 0, \\ Q(t, 20x, 21idy) &= p_i f_2(x - y) \cdot 1_{x-y}(t)dy, \quad 0 < y < x, \\ Q(t, 20x, 11dy) &= f_2(x + y) \cdot 1_x(t)dy, \quad y > 0, \\ Q(t, 11x, 10x) &= 1(t), \\ Q(t, 21x, 20x) &= G_i(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Рассматриваемый случай имеет систему уравнений марковского восстановления (УМВ) [18, 26, 27]:

$$\begin{cases} \bar{\Phi}_1(x, t) = \sum_{i=1}^n \int_0^{t-x} f_1(x + y) p_i \bar{\Phi}_{3i}(y, t - x) dy + \bar{F}_1(t), \\ \bar{\Phi}_2(x, t) = \sum_{i=10}^n \int_0^x f_2(x - s) p_i \bar{\Phi}_{3i}(s, t - x + s) ds, \\ \bar{\Phi}_{3i}(x, t) = \int_0^{t-x} g_i(t - x - \tau) \bar{\Phi}_2(x, x + \tau) d\tau + \bar{G}_i(t - x), \end{cases} \quad (5)$$

Данная система интегральных уравнений представляет собой систему уравнений Вольтерра второго рода. Решим её методом последовательных приближений [28].

Подставив в системе (5) третье уравнение во второе:

$$\bar{\Phi}_2(x, t) = \sum_{i=10}^n \int_0^x f_2(x - s) p_i ds \left[\int_0^{t-x} g_i(t - x - \tau) \bar{\Phi}_2(s, s + \tau) d\tau + \bar{G}_i(t - x) \right]; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_2(x, t) &= \sum_{i=1}^n p_i \int_0^x f_2(x - s) ds \int_0^{t-x} g_i(t - x - \tau) \bar{\Phi}_2(s, s + \tau) d\tau + \\ &+ \sum_{i=1}^n p_i \int_0^x f_2(x - s) \bar{G}_i(t - x) ds. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\bar{\Phi}_2(x,t) = \sum_{i=1}^n p_i \int_0^x f_2(x-s) ds \int_0^{t-x} g_i(t-x-\tau) \bar{\Phi}_2(s,s+\tau) d\tau + \sum_{i=1}^n p_i F_2(x) \bar{G}_i(t-x); \quad (8)$$

$$\bar{\Phi}_2(x,t) = \sum_{i=1}^n p_i \int_0^x ds \int_0^{t-x} f_2(x-s) g_i(t-x-\tau) \bar{\Phi}_2(s,s+\tau) d\tau + \sum_{i=1}^n p_i F_2(x) \bar{G}_i(t-x); \quad (9)$$

$$\bar{\Phi}_2(x,t) = \sum_{i=1}^n p_i \int_0^{t-x} g_i(t-x-\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) \bar{\Phi}_2(s,s+\tau) ds + \sum_{i=1}^n p_i F_2(x) \bar{G}_i(t-x). \quad (10)$$

Представим

$$g_\Sigma(x) = \sum_{i=1}^n p_i g_i(x) \text{ и } G_\Sigma(x) = \sum_{i=1}^n p_i G_i(x),$$

тогда:

$$\bar{\Phi}_2(x,t) = \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) \bar{\Phi}_2(s,s+\tau) ds + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x). \quad (11)$$

Представив начальное приближение:

$$\bar{\Phi}_2^0(x,t) = F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x). \quad (12)$$

Найдем выражение для первого приближения:

$$\bar{\Phi}_2^1(x,t) = \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) F_2(s) \bar{G}_\Sigma(\tau) ds + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x); \quad (13)$$

$$\bar{\Phi}_2^1(x,t) = \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) \bar{G}_\Sigma(\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) F_2(s) ds + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x); \quad (14)$$

$$\bar{\Phi}_2^1(x,t) = \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) \bar{G}_\Sigma(\tau) d\tau F_2^*(x) + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x); \quad (15)$$

$$\bar{\Phi}_2^1(x,t) = F_2^*(x) \bar{G}_\Sigma^*(x)(t-x) + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x). \quad (16)$$

Второе приближение определим следующим образом:

$$\bar{\Phi}_2^2(x,t) = \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) \bar{G}_\Sigma^*(\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) F_2^*(s) ds + \quad (17)$$

$$+ \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) \bar{G}_\Sigma(\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) F_2(s) ds + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x)$$

$$\bar{\Phi}_2^2(x,t) = F_2^{*(2)}(x) \bar{G}_\Sigma^{*(2)}(t-x) + F_2^*(x) \bar{G}_\Sigma^*(t-x) + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x) \quad (18)$$

Тогда m -е приближение будет иметь вид:

$$\bar{\Phi}_2^m(x,t) = \sum_{j=1}^m F_2^{*(j)}(x) \bar{G}_\Sigma^{*(j)}(t-x). \quad (19)$$

Тогда решение системы (5) имеет вид:

$$\bar{\Phi}_2(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} F_2^{*(j)}(x) \bar{G}_\Sigma^{*(j)}(t-x),$$

$$\bar{\Phi}_{3i}(x,t) = \int_0^{t-x} g_i(t-x-\tau) \sum_{j=1}^{\infty} F_2^{*(j)}(x) \bar{G}_\Sigma^{*(j)}(\tau) d\tau + \bar{G}_i(t-x),$$

$$\bar{\Phi}_1(x, t) = \sum_{i=1}^n \int_0^{t-x} f_1(x+y) p_i \bar{\Phi}_{3i}(y, t-x) dy + \bar{F}_1(t), \quad (20)$$

где n – количество видов отказов в рассматриваемом технологическом процессе.

Зависимость (20) представляет собой зависимость время цикла обслуживания $\bar{\Phi}_1(x, t)$ в виде функции распределения для технологической ячейки единицы продукции. Данная функция зависит от начального состояния $10x$, содержащего непрерывную компоненту x . Тогда усредненная функция распределения $F_\theta(t)$ случайной величины времени цикла обслуживания θ для технологической ячейки единицы продукции примет вид

$$F_\theta(t) = \frac{\int \rho(dx) F_x(t)}{\rho(E_k)} \quad (21)$$

независимо от начального состояния, усредним ФР по формуле [18, 27], где $\rho(dx)$ – стационарное распределение вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{\xi_n, n \geq 0\}$, $F_x(t)$ – функция распределения времени пребывания в состоянии x , E_k – исследуемое подмножество состояний.

Тогда решение для системы будет иметь вид [26, 27]:

$$\rho_{10}(x) = \rho_{11}(x) = \rho_0 \bar{F}_2(x); \quad (22)$$

$$\rho_{20}(x) = \rho_0 \bar{F}_1(x), \quad (23)$$

$$\rho_{21i}(x) = p_i \rho_0 \bar{F}_1(x), \quad (24)$$

где p_i – вероятность осуществления i -го отказа.

Искомая функция распределения $F_\theta(t)$ случайной величины времени цикла обслуживания единицы продукции θ технологического процесса с учетом его отказов примет вид:

$$\bar{F}_\theta(t) = \frac{\int_0^\infty \bar{F}_2(x) \Phi_1(x, t) dx}{M\alpha_2}. \quad (25)$$

3 Результаты исследований

Выражение (25) представляет описание функционирования технологической системы. (рис. 3). Исходными данными для моделирования служат ФР $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$, $G_3(t)$ и $G_4(t)$; будем считать доказанным, что они распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка, причем его параметры имеют следующие значения:

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

где $\lambda_1 = 1,101 \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_2 = 10,899 \text{ ч}^{-1}$;

$$f_2(t) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t})}{\alpha_2 - \alpha_1},$$

где $\alpha_1 = 0,1101 \text{ ч}^{-1}$, $\alpha_2 = 1,0899 \text{ ч}^{-1}$;

$$g_1(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1},$$

где $\mu_1 = 2,202 \text{ ч}^{-1}$, $\mu_2 = 21,798 \text{ ч}^{-1}$;

$$g_2(t) = \frac{\beta_1 \beta_2 (e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t})}{\beta_2 - \beta_1},$$

где $\beta_1 = 0,275 \text{ ч}^{-1}$, $\beta_2 = 2,725 \text{ ч}^{-1}$;

$$g_3(t) = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2 - \gamma_1},$$

где $\gamma_1 = 0,551 \text{ ч}^{-1}$, $\gamma_2 = 5,449 \text{ ч}^{-1}$;

$$g_4(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1},$$

где $\nu_1 = 0,220 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_2 = 2,180 \text{ ч}^{-1}$.

На основе построенной математической модели было проведено компьютерное моделирование (параметры табл. 1 и 2: четыре вида отказов; время обслуживания заготовки 5 с. и менее, детали: группы 10-100 деталей, партии – более 10000 шт.). Вид полученной функции распределения $F_\theta(t)$ представлен на рисунке 3, при этом математическое ожидание составило 1,015 ч.

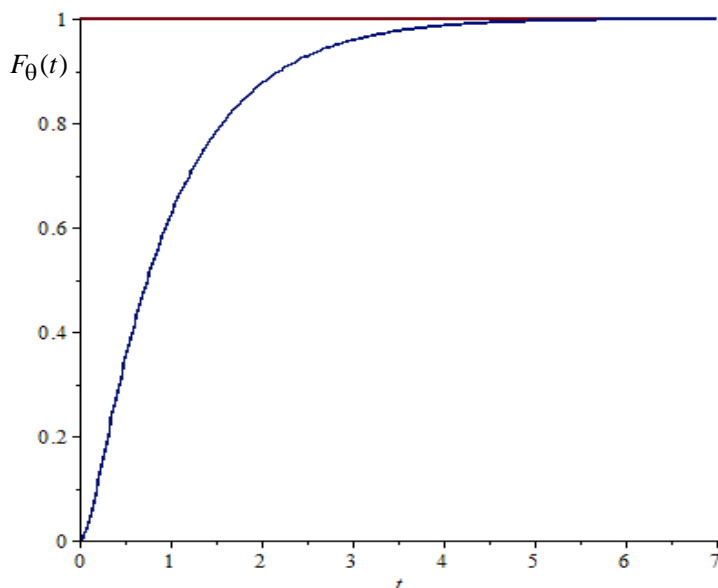


Рисунок 3 – Функция распределения времени восстановления $F_\theta(t)$

Данный результат представляет исходную информацию для моделирования производственной системы в части механической сборки, включающей оборудование накатки резьбы в качестве подсистемы.

4 Обсуждение и заключение

Разработанная полумарковская математическая модель технологического процесса позволяет рассчитывать его производительность с учетом имеющихся видов отказов и оценивать процент годных резьбовых деталей в партии. Это дает возможность определять резервы производства в отношении повышения качества и производительности получения резьбы.

Поскольку процессы изготовления деталей с резьбой и сборки изделий с данным деталями имеют тесную связь технологической наследственности, то полученные результаты моделирования технологических процессов накатки резьбы в виде функций распределений могут служить исходными данными для модели производства автоматической сборки узлов. Так, например, на основе такого подхода для условий механосборочного производства мо-

жет быть получена методология моделирования сходящихся структур автоматизированных линий, которая будет совместима с предлагаемой моделью [18].

При необходимости, предлагаемая полумарковская математическая модель может применяться для моделирования производства с различным оборудованием, например, для обработки заготовок и сборки изделий машиностроения.

Развитие исследований в рассматриваемой технологической области представляется возможным в направлении использования полумарковских математических моделей в имитационном моделировании. Это позволяет формировать необходимые условия для повышения адекватности предложенных решений на основе ПММ при различных исходных данных и устанавливать границы ее корректного применения.

Список литературы

- 1 Суслов А. Г., Дальский А. М. Научные основы технологии машиностроения. М. : Машиностроение, 2002. – 684с.
- 2 Суслов А. Г., Федоров В. П., Горленко О. А. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
- 3 Инженерия поверхности деталей / колл. авторов; под ред. А.Г. Суслова. – М. : Машиностроение. 2008. – 320 с.
- 4 Хейфец М. Л. Математическое моделирование технологических процессов. – Новополюцк, ПГУ. 1999. – 104с.
- 5 Технология автоматической сборки / А. Г. Холодкова, М. Г. Кристалль, Б. Л. Штриков и др. – М. : Машиностроение, 2010 – 560 с.
- 6 Никитин, К. В. Управление качеством литых изделий из алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности / К. В. Никитин, В. И. Никитин, И. Ю. Тимошкин. – М. : Радуница, 2015. – 228 с.
- 7 Замятин, В. М. К вопросу о металлургической наследственности и формировании свойств металлопродукции / В. М. Замятин, Б. А. Баум // Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства. Труды 3-й Всеросс. Научно-практ. конф. Самара : СамГТУ. 2010. – 1-й электронно-оптич. диск.
- 8 Липка, В. М. Анализ воздействия технологической наследственности при изготовлении деталей с резьбой на надежность резьбовых соединений в судовых машинах и механизмах/ В. М. Липка, Ю. Л. Рапацкий // Ушаковские чтения : Материалы Пятой Межвузовской научно-практической конференции (Севастополь, 22-23 февраля 2018 г.). – Севастополь : ООО «ПК КИА», 2018. – с. 61-69
- 9 Липка, В. М. Повышение надежности резьбовых соединений при сборке автомобильных силовых агрегатов/ В. М. Липка, Ю. Л. Рапацкий // Высокие технологии в машиностроении : сб. науч. трудов. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2012. – Вып.1 (22). – с. 199-210.
- 10 Королук В. С. Стохастические модели систем / Отв. ред. А. Ф. Турбин. – К : Наук. думка. 1989. – 208 с.
- 11 Копп В. Я., Обжерин Ю. Е., Песчанский А. И. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В. Я. Копп, Ю. Е. Обжерин, А. И. Песчанский. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2000. – 284 с.
- 12 Броди С. М. Расчет и планирование испытаний систем на надежность / С. М Броди, О. Н Власенко, Б. Г. Марченко. – К. : Наукова думка, 1970. – 192 с.
- 13 Obzherin Yu. E., Boyko Ye. G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. Elsevier, Academic press, USA, 2015. – 214 p.
- 14 Peschansky A. I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany : LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
- 15 Ямпольский, Л. С. Автоматизация проектирования и управления в гибком автоматизированном производстве/ Л. С. Ямпольский, З. Банашак.– К. : Тэхника, 1989. – 214 с.

- 16 Степнов М. Н., Шаврин А. В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : Справочник. – М. Машиностроение 2005 – 430 с.
- 17 Королук, В. С. Полумарковские процессы и их приложения / В. С. Королук, А. Ф. Турбин. – К. : Наук. думка, 1976. – 181 с.
- 18 Копп В. Я. Моделирование автоматизированных производственных систем : монография. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 700 с.
- 19 Якухин В. Г. Высокотехнологичные методы металлообработки : Учебник. – Под ред. О. В. Таратынова. – М. : МГИУ, 2011. – 362 с.
- 20 Афонин, А. Н. Схемы деформирования при накатывании резьб / А. Н. Афонин, А. В. Киричек // Известия ОрелГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии : сб. науч. тр. – Орел, 2009. – Вып. 6/278 (577). – С. 39-42.
- 21 Киричек, А. В. Определение диаметра заготовок под накатывание резьбы с помощью систем 3D моделирования / А. В. Киричек, А. Н. Афонин // СТИН. – 2005. – № 6. – С. 28-30.
- 22 Прокофьев А. Н. Разработка системы выбора оптимального метода обработки резьбы. // Качество машин. Сборник трудов. Брянск. – БГТУ. – 2001. – С.88 – 89.
- 23 Анцупов, В. П. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов / В. П. Анцупов, Л. Т. Дворников, Д. Г. Громаковский и др. // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова, 2014, № 1 – с.141-146.
- 24 Киричек А. В., Афонин А. Н. Резьбонакатывание. : Библиотека технолога. – М. : Машиностроение, 2009. – 312 с.
- 25 Копп, В. Я. Использование нейронных сетей при анализе функционирования технической структуры с временным резервированием / В. Я. Копп, А. Л. Карташов., М. В. Заморенов, Л. Е. Карташов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12 : в 2 ч. Ч. 1 Тула : Изд-во ТулГУ, 2015, – С. 67-80.
- 26 Копп, В. Я. Моделирование автоматизированных линий / В. Я. Копп, Ю. Е. Обжерин, А. И. Песчанский. Монография. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2006. – 240 с.
- 27 Королук, В. С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В. С. Королук, А. Ф. Турбин. – К. : Наук. думка.1982. – 236 с.
- 28 Михлин С. Г. Интегральные уравнения и их приложения к некоторым проблемам механики, математической физики и техники. М. : Гостехиздат, 1949. – 380 с.

References

- 1 Suslov A G, Dalsky A M Scientific fundamentals of mechanical engineering. M. : Engineering, 2002. – 684 s.
- 2 Suslov A G, Fedorov V P, Gorlenko O A etc. Technological security former pluatatsionnyh properties of machine parts and their compounds. M. : Engineering, 2006. – 448 p.
- 3 Engineering surface parts / call. authors; Ed. A. G. Suslova. –M. : Maengineering industry. 2008. – 320 p.
- 4 Heifetz M L Mathematical modeling of technological processes. – Novo-Polotsk, PSU. 1999. – 104 с.
- 5 Technology of automated build / A G Kholodkova, M G Cristal, B L Strik et al. M. : Engineering, 2010 – 560 p.
- 6 Nikitin K V quality control of cast products made of aluminum alloys based on the phenomenon of structural heredity / K V Nikitin, V I Nikitin, I Y T-Moshkin. – M. : Radunitsa, 2015. – 228 p.
- 7 V. M Zamiatin On the question of heredity and the formation of metallurgical properties of steel / V M Zamyatin, B A Baum // The interaction-Corollary science and foundry and metallurgical production. Proceedings of the 3rd All-Russia. Scient. conf. Samara : Samara State Technical University. 2010 - 1 st electron-Opt. disk.
- 8 Lipka V M Analysis technological heredity impact the manufacture of parts with the thread on the reliability of threaded connections in ship engines and mechanisms / V M Lipka, J L

Rapacki Ushakov // read : Proceedings of the Fifth Interuniversity scientific and practical conference (Sevastopol, 22-23 February 2018). – Sevastopol : ООО "PK KIA", 2018. – s. 61-69.

9 V M Lipka Improving the reliability of threaded connections in the assembly of automotive powertrains / V M Lipka, J L Rapacki // High technologies in mechanical engineering : Sat. Scientific Labor. – KHARKIV, NTU "KPI", 2012. – Issue 1 (22). – With. 199-210.

10 Koroljuk V S Stochastic models of systems / Ed. Ed. A. F. Turbines. – By : Science. Dumka. 1989. – 208 p.

11 Kopp V Y, Obzherin Y E, Peschanskii A I Stochastic models automate Rowan-production systems with the temporary backup / V J Kopp, J E On-zherin, A I Peschanskii. – Sevastopol : Publ SevNTU, 2000. – 284 p.

12 S. Brody Calculation and planning of test systems reliability / S M Brodie, Vlasenko, B G Marchenko. – K. : Naukova Dumka, 1970. – 192 p.

13 Obzherin Yu. E., Boyko Ye. G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. Elsevier, Academic press, USA, 2015. – 214 p.

14 Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. 138 p.

15 Yampolskii L S Computer-aided design and management in flexible manufacturing of auto-and enshrined / L S Yampolsky, Z. Banashak. – K. : TECHNIK, 1989. – 214 p.

16 Stepnov M N Shavrin A V Statistical methods for processing the results of the testical fur : A Handbook. – M. Mashinostroenie 2005 – 430 s.

17 Koroljuk V S Semi-Markov processes and their applications / V S Koroljuk, A F Turbines. – K. : Science. Dumka, 1976. – 181 p.

18 Kopp V J Simulation of automated production systems : monograph. – Sevastopol : Sevastopol National Technical University, 2012. – 700 p.

19 Yakuhin V G High-tech methods of metalworking : Tutorial. – Ed. O. V. Taratynova. – M. : MGIU, 2011. –362 p.

20 Afonin A N Scheme deformation by rolling at threads / A N Afonin, A V Kirichek // News OrelGTU. Ser. Fundamental and applied problems of ma-ki and technology : Sat. Scientific Tr. – Eagle, 2009. – Vol. 6/278 (577). – S. 39-42.

21 A V Kirichek Determination of the diameter of the thread by rolling billets at a Pomoschyu systems 3D modeling / A V Kirichek, A N Afonin // STIN. – 2005. – № 6. – S. 28-30.

22 A N Prokofiev Development of the system of choosing the optimal method of processing threads // Quality machines. Collection of Labors. Bryansk. – BSTU. – 2001. – P. 88-89.

23 Antsupov V P Basic physical machine parts reliability theory of Crete-Riyam kinetic strength of materials / V P Antsupov, L T Janitors, D G Gromakovsky, etc. // Vestnik MSTU. G. I. Nosov 2014, № 1 – s. 141-146.

24 Kirichek A V, Afonin A N Thread rolling : technologist Library. – M. : Engineering, 2009. – 312 p.

25 Kopp V. Ya. The use of neural networks for the analysis of the technical structure with temporal redundancy operation / V Y Kopp, Kartashov A L., M. V.Zamorenov, L E Kartashov // Proceedings of the TSU. Technical science. Vol. 12 : 2 hours Part 1 Tula :. Publ TSU, 2015, pp 67-80.

26 Kopp V. Ya. Simulation of automated production lines / V J Kopp, J E Obzherin, A I Peschanskii. Monograph. – Sevastopol : Publ SevNTU, 2006. – 240 p.

27 Koroljuk V S Processes Markov recovery in reliability problems in B tems / V S Koroljuk, A F Turbines. – K. : Science. dumka. 1982. – 236.

28 Mikhlin S G Integral equations and their applications to some problems of mechanics, mathematical physics and engineering. M. : Gostekhizdat, 1949. – 380 p.