УДК 004.94:658.512

МЕТОД НОРМИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

[1]Радыгин А.Б., [2]Сердюк А.И., [2]Сергеев А.И.

[1]АО «ПО «Стрела», Оренбург, e-mail: alexandr_sergeew@mail.ru;
[2]ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Оренбург, e-mail: alexandr_sergeew@mail.ru

В статье рассматривается метод нормирования надежности оборудования, применяемый при проектировании гибких производственных систем. Отличительной особенностью метода является оценка проектных решений на основе анализа вероятностей отказа работы комплектующего оборудования и допустимых потерь эффективности гибкой производственной системы. Показано, что случайные возмущения, приводящие к рассеянию длительности технологических и сервисных операций, имеют место даже при гарантированной надежности всех элементов системы. Приведена классификация вероятностных возмущений, выделены составляющие производственного цикла, рассматриваемые в исследовании, которые могут иметь собственные границы отклонения от номинальных значений и собственные законы распределения этих величин. В работе исследуются три закона распределения случайных величин, имеющих наибольшее распространение в практике: экспоненциальный, нормальный и Пуассона. Представлен алгоритм имитационного моделирования функционирования гибкой производственной системы с возмущениями, описан процесс верификации разработанного на основе этого алгоритма программного кода. Приведены результаты вычислительных экспериментов, направленных на выявление рекомендуемых проектных значений организационно-технических параметров в зависимости от надежности соответствующего оборудования. На основе проведенного исследования предложен метод нормирования надежности оборудования, применяемый при проектировании гибкой производственной системы, позволяющий выявить интервалы допустимых значений организационно-технических параметров и надежности, рекомендуемые при формировании Технического предложения по ее созданию.

Ключевые слова: надежность оборудования, гибкая производственная система, вероятность отказа, нормирование надежности

METHOD OF RATIONING EQUIPMENT RELIABILITY WHEN DESIGNING FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEMS

[1]Radygin A.B., [2]Serdyuk A.I., [2]Sergeev A.I.

[1]JSC «PA «Strela», Orenburg, e-mail: alexandr_sergeew@mail.ru;
[2]Orenburg State University, Orenburg, e-mail: alexandr_sergeew@mail.ru

The article discusses the method of rationing the reliability of equipment used in the design of flexible production systems. A distinctive feature of the method is the evaluation of design solutions based on the analysis of the probability of failure of the component equipment and the permissible loss of efficiency of a flexible production system. It is shown that random disturbances leading to the dispersion of the duration of technological and service operations take place even with guaranteed reliability of all elements of the system. The classification of probabilistic outcomes is given, the components of the production cycle considered in the study are distinguished, which can have their own boundaries of deviation from the nominal values and their own laws of distribution of these values. The paper studies three laws of distribution of random variables, which are the most common in practice: exponential, normal and Poisson. The algorithm of simulation of functioning of flexible production system with disturbances is presented, the process of verification of the program code developed on the basis of this algorithm is described. The results of computational experiments aimed at identifying the recommended design values of organizational and technical parameters depending on the reliability of the corresponding equipment are presented. On the basis of the conducted research the method of rationing of reliability of the equipment applied at design of the flexible production system is offered, allowing to reveal intervals of admissible values of organizational and technical parameters and reliability recommended at formation of the Technical offer on its creation.

Keywords: equipment reliability, flexible production system, failure probability, reliability rating

Одной из составляющих материальной базы цифровой экономики служит все более широкое применение гибких производственных систем (ГПС), способных в автоматическом режиме выпускать продукцию требуемого качества, в необходимом количестве в установленные сроки и при наименьшей себестоимости. Наиболее ответственным и наукоемким этапом создания ГПС являются предпроектные исследования, включающие переход от технических требований Заказчика к Техническому Заданию. Ошибки проектировщиков, допущенные при формировании Технического предложения, могут проявиться лишь при эксплуатации ГПС, а их исправление потребует неоправданных капитальных вложений. К подобного рода ошибкам следует отнести оценку возможных вероятностных возмущений, возникающих при функционировании системы из-за рассеяния длительности технологических и транспортных

операций, вероятностных сбоев и отказов оборудования. Возникает актуальная научно-практическая задача разработки метода нормирования надежности работы оборудования и значений организационно-технических параметров системы в зависимости от допустимых потерь эффективности функционирования ГПС при эксплуатации.

Цель исследования: совершенствование процесса проектирования ГПС на основе нормирования надежности комплектующего оборудования.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1) разработана компьютерная модель функционирования ГПС с учетом вероятностных возмущений производственного процесса;

2) проведены вычислительные эксперименты для исследования влияния надежности комплектующего оборудования на эффективность функционирования ГПС;

3) сформулирован метод нормирования надежности комплектующего оборудования при автоматизированном синтезе технического предложения по созданию ГПС.

Обзор литературных источников, проведенный в работах [1–2], показал, что случайные возмущения, приводящие к рассеянию длительности технологических и сервисных операций, имеют место даже при гарантированной надежности всех элементов системы. Причинами таких возмущений являются колебания: припусков на обработку, твердости обрабатываемого материала и режущего инструмента, нагрева исполнительных механизмов, точности позиционирования исполнительных органов станка, массы перемещаемых заготовок и инструментов, расстояний транспортных операций [3–5]. Дополнительную стохастику создают вероятностные возмущения, вызванные сбоями и отказами в работе комплектующего ГПС оборудования [6] (рис. 1).

Для оценки эффективности проектируемой ГПС используется моделирование. Универсальные инструменты моделирования, такие как Arena, AnyLogic, GPSS, имеют интегрированные модули реализации множества законов распределения случайных величин. Однако недостатком таких систем является высокая трудоемкость создания таких сложных моделей, как модель ГПС. Специализированные программные продукты поддержки принятия решений при проектировании ГПС, разработанные в Аэрокосмическом институте ОГУ – приложения «Расписание», «PolyTrans», «FMS concept» – основаны на едином, глубоко проработанном детерминированном аппарате формализованного описания ГПС, позволяющем для множества входных технических, технологических и управленческих параметров системы оценить эффективность ее функционирования рядом показателей эффективности. Недостаток используемого аппарата – отсутствие возможности учета случайных возмущений производственного процесса. Таком образом, принято решение о доработке аппарата формализованного описания ГПС, применяемого в специализированных программных продуктах, модулями, позволяющими учитывать случайные возмущения, возникающие в процессе работы ГПС.

Разработка метода нормирования надежности оборудования ГПС

В процессе исследования выделены следующие цикловые составляющие, которые могут иметь собственные границы отклонения от номинальных значений и собственные законы распределения этих величин:

– $t_{тр1}$ – время доставки заготовки к станку;

– $t_{зв1}$ – время загрузки в пристаночный накопитель;

– $t_{ож1}$ – время ожидания обработки;

– $t_{зв2}$ – время загрузки заготовки в рабочую зону;

– $t_{обр}$ – время обработки заготовки;

– $t_{зв3}$ – время выгрузки детали в накопитель;

– $t_{ож2}$ – время ожидания в накопителе;

– $t_{зв4}$ – время выгрузки на робокар;

– $t_{тр2}$ – время транспортирования на склад;

– $T_{дет}$ – общее время цикла изготовления детали.

Для выделенных элементарных цикловых составляющих времени выполнения технологических и сервисных операций реализованы три закона распределения случайных величин, имеющих наибольшее распространение в практике: экспоненциальный, нормальный и Пуассона. Верификация математических моделей случайных возмущений выполнялась на специально разработанном для этого приложении, позволяющем оценить влияние вводимых параметров на кривые вероятностного распределения в соответствии с выбранными законами (рис. 2).

С применением разработанных модулей, реализующих законы распределения случайных величин, модифицирован базовый алгоритм имитационного моделирования, реализованный в специализированных программных продуктах поддержки принятия решений при проектировании ГПС (рис. 3).

Внесение усовершенствований в базовый алгоритм имитационного моделирования потребовало выполнения процедур верификации разработанного программного кода.

Рис. 1. Структурная схема случайных возмущений в работе ГПС

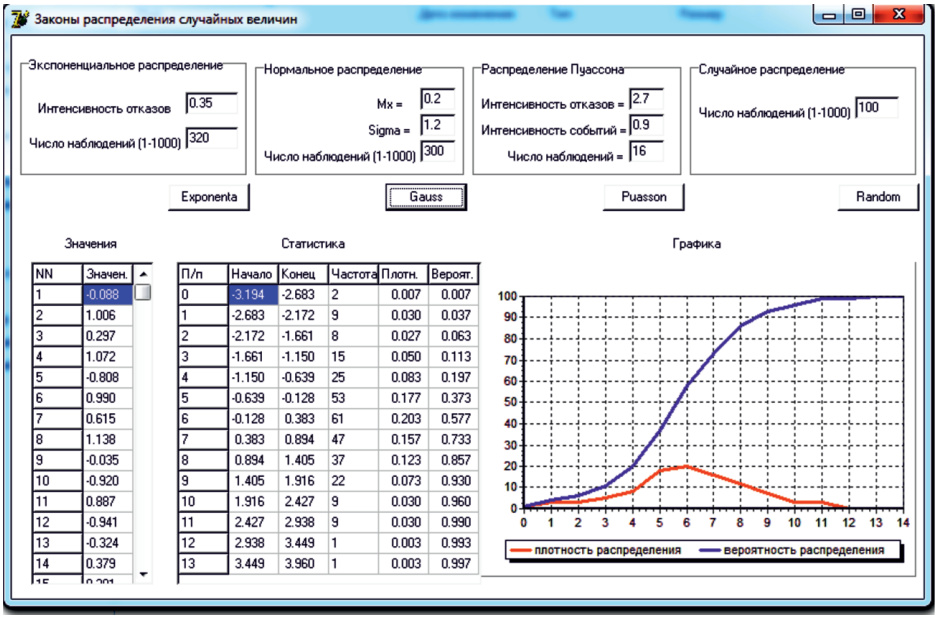

Рис. 2. Приложение для верификации математических моделей случайных возмущений

Верификация включала:

– оценку чувствительности приложения к изменению входных данных, при которой для различных данных фиксировались отличия в автоматически генерируемых циклограммах работы ГПС;

– формальные процедуры верификации, при которых оценивалось соответствие получаемых результатов логически ожидаемым;

– расчеты на тестовом примере, при которых программно получаемые результаты

подвергались пошаговой проверке с помощью программы-калькулятора.

В результате выполнения процедур верификации установлено, что исходный код разработанного приложения адекватно и в полной мере соответствует используемым математическим моделям и алгоритмам.

С помощью разработанного приложения выполнены вычислительные эксперименты, направленные на выявление рекомендуемых проектных значений организационно-технических параметров X_i в зависимости от надежности $P(X_i)$ соответствующего оборудования.

В качестве примера на рис. 4 представлены рекомендуемые значения длительности цикла загрузки станка и скорости перемещения робокара в зависимости от допустимых потерь срока окупаемости ГПС и вероятностей отказов указанного оборудования.

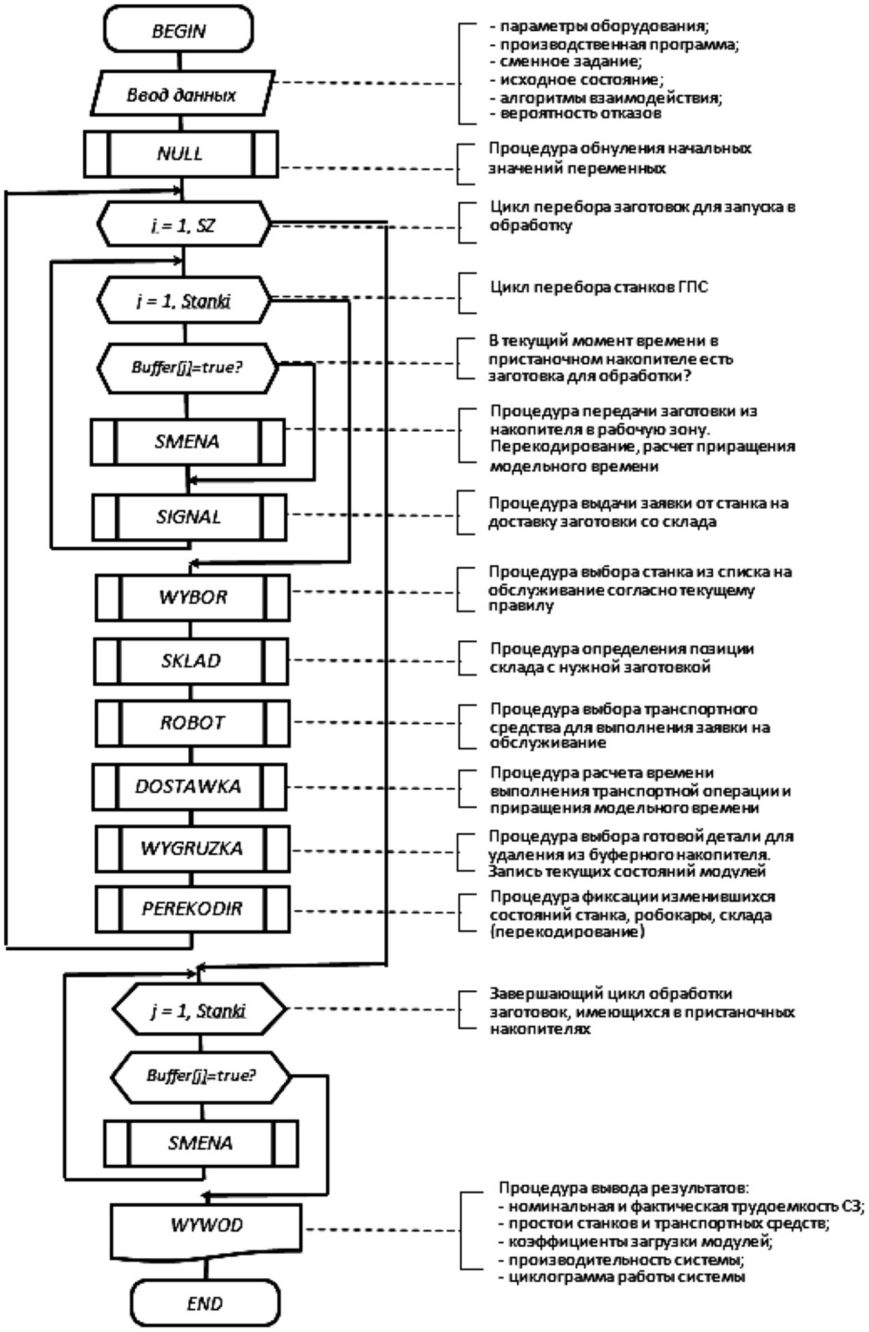

Рис. 3. Алгоритм имитационного моделирования с возмущениями

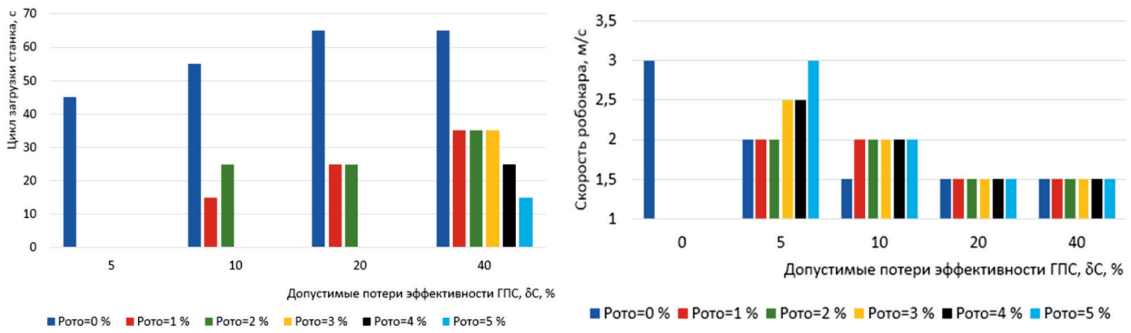

Рис. 4. Рекомендуемая длительность цикла загрузки станков и скорости робокара в зависимости от их отказов и потерь эффективности ГПС

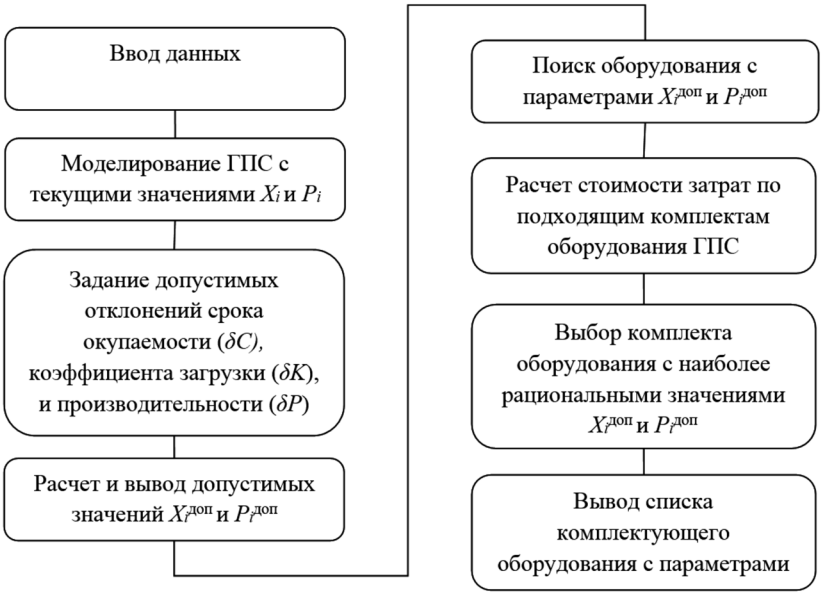

Рис. 5. Метод нормирования надежности оборудования при проектировании гибких производственных систем

Рассмотрим результаты, приведенные на рис. 4, для заданного значения допустимых потерь срока окупаемости $\delta C = 5{,}0\,\%$ относительно скорости перемещения робокара. Для робокара с вероятностью отказа $P \leq 2{,}0\,\%$ достаточна скорость перемещения 2,0 м/с, для робокара с вероятностью отказа в диапазоне $3{,}0 \leq P \leq 4{,}0\,\%$ необходима скорость, равная 2,5 м/с, а для робокара с вероятностью отказа $P = 5{,}0\,\%$ необходима уже скорость, равная 3,0 м/с, Соответственно, увеличиваются мощность привода, энергозатраты и стоимость оборудования. Разработанное приложение позволяет оценить подобным образом все организационно-технические параметры проектируемой ГПС.

Тогда метод нормирования надежности оборудования при проектировании гибких производственных систем можно представить в виде алгоритма, приведенного на рис. 5.

Выводы

Предложенный метод нормирования надежности оборудования, применяемый при проектировании ГПС, позволил выявить интервалы допустимых значений организационно-технических параметров X_i и надежности $P(X_i)$, рекомендуемые при формировании Технического предложения по созданию ГПС, например:

– максимальная эффективность при вероятности отказа работы транспортного средства $P_{отс} < 5{,}0\,\%$ достигается при скорости робокара $V_{тс} \geq 2{,}0$ м/с. При $P_{отс} = 5{,}0 - 10{,}0\,\%$ рекомендуется $V_{тс} = 2{,}5 - 3{,}0$ м/с, при $P_{отс} > 10{,}0\,\%$ потери эффективности ГПС резко возрастают: для $P_{отс} = 40{,}0\,\%$

и $V_{тс}$ = 3,0 м/с увеличение срока окупаемости составит Δ_C = 38,5 %;

– длительность цикла загрузки станка рекомендуется в пределах $T_{см}$ = 15 – 35 с при вероятности отказов основного технологического оборудования $P_{ото}$ = 0 %, однако при $T_{см}$ = 15 с и $P_{ото}$ > 5,0 % потери по сроку окупаемости составляют уже Δ_C = 37,1 %.

Выявленные с применением разработанного метода нормирования надежности оборудования ГПС зависимости позволяют эффективно варьировать организационно-технические параметры системы для подбора варианта, удовлетворяющего техническому заданию с минимальной стоимостью.

Список литературы

1. Сердюк А.И., Сергеев А.И., Корнипаев М.А., Проскурин Д.А. Формализованное описание работы гибких производственных систем при создании систем компьютерного моделирования // СТИН. 2016. № 7. С. 12–18.

2. Сердюк А.И., Сергеев А.И., Радыгин А.Б. Компьютерное моделирование гибких производственных систем с автоматизированной системой инструментального обеспечения // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 9. С. 387–392.

3. Ченгарь О.В. Имитационный алгоритм моделирования организационно-технологических процессов в гибкой производственной системе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 4 (141). С. 185–193.

4. Прохончуков С.Р., Подлевских А.П. Повышение эффективности распределения пропускной способности магистрали сети автоматизированной системы управления между гибкими производственными модулями // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. С. 783–792.

5. Трухин В.В. Гибкие производственные системы: учеб. пособие. Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т, 2010. 136 с.

6. Jain S., Foley W.J. Impact of Interruptions on Schedule Execution in Flexible Manufacturing Systems. International Journal of Flexible Manufacturing Systems. 2002. Vol. 14. Issue 4. P. 319–344.