

Введение Современные производственно-технические системы - автоматические линии, роботизированные комплексы, гибкие производственные системы и другие виды технических объектов, функционирующих в различных отраслях техники, представляют собой сложные по структуре, компоновке и организации работы системы технологических, вспомогательных машин и других технических средств, связанных между собой и функционирующих в определенном взаимодействии, причем чем согласованнее это взаимодействие, тем выше производительность и другие выходные технико-экономические показатели таких систем. Проектирование подобных объектов, особенно на ранних стадиях, когда необходимо получить предварительную, укрупненную оценку эффективности альтернативных конкурирующих проектных вариантов, является весьма сложной и актуальной задачей, требующей дальнейшего развития методов моделирования, автоматизированного проектирования и расчета. Сложность организации и структуры современного производства предопределяет большое число возможных вариантов его реализации, при этом наибольшая ответственность принимаемых технических решений смещается именно на ранние стадии разработки, когда закладываются основные организационные и конструктивно-компоновочные параметры, в значительной степени определяющие выходные технико-экономические показатели функционирования системы. Интуитивные, недостаточно обоснованные проектные решения в таких условиях могут привести к грубым просчетам и снижению эффективности технологических систем, особенно с учетом значительной стоимости современного автоматизированного оборудования [1]. С другой стороны, при проектировании современного производства практически невозможна постановка комплексного натурного эксперимента, направленного на оценку достоверности результатов проектирования. Такой эксперимент был бы неоправданно дорогим и трудоемким. Традиционные подходы к разработке производственных систем и принятию проектных решений базируются, как правило, на инженерных методах обоснования и расчета конструкции технических средств, их кинематики, прочности отдельных узлов и элементов, а также на технологических аспектах работы таких систем [2]. Подобные методы не учитывают высокой структурной и организационной сложности современного производства, что существенно снижает качество проектирования и точность получаемых решений. Это недопустимо, учитывая высокую стоимость реализации таких проектов. Поэтому необходимой предпосылкой успешного проектирования, исследования и реализации технологических систем в современных условиях является стратегия, при которой основные технические решения на ранних стадиях разработки принимаются, в первую очередь, на основе научных подходов с использованием предшествующего моделирования и автоматизированного проектирования, позволяющих реализовать итерационный процесс определения компоновки, структуры и выбора большого числа

проектных параметров, Данный подход связан с существенной трудоемкостью, поскольку включает обычно многочисленные повторения процедур анализа, оптимизации и синтеза проектных решений. Он, однако, обеспечивает существенное повышение точности моделирования, в том числе за счет включения в математические модели большого числа внутренних проектных параметров и корректного выбора целевых функций эффективности. Еще одним существенным недостатком, характерным для традиционного проектирования технических систем, является игнорирование вероятностного характера протекающих в системах процессов, что особенно характерно для серийного производства [3]. Источником стохастичности является целый ряд случайных факторов, в том числе разное время обработки деталей в многономенклатурных технологических системах, меняющаяся протяженность транспортных маршрутов, случайный характер отказов оборудования и случайное время его восстановления, случайный во времени характер вспомогательных операций по загрузке-разгрузке оборудования и т.д. В таких условиях использование для расчета традиционных детерминированных моделей может привести к грубым просчетам и снижению эффективности проектируемых систем в случае их реализации [4]. Целью настоящей работы является повышение эффективности и дальнейшее развитие научно-методологических подходов к проектированию сложных по организации и структуре производственно-технических систем на ранних стадиях разработки (стадии технического задания, технического предложения). Для достижения указанной цели необходим комплексный инженерно-научный подход, предполагающий решение следующих задач:

- Анализ и корректный выбор математического аппарата и методов моделирования, в наибольшей степени учитывающих конкретные условия и особенности проектируемой системы;
- Составление математических моделей с учетом особенностей ранних стадий разработки;
- Обоснование выбора внутренних параметров системы, ее выходных характеристик, которые должны быть учтены в модели. Составление целевой функции эффективности, выбор критериев оптимальности.
- Получение и обработка результатов моделирования, оценка точности моделей;

Рассмотрим некоторые подходы к моделированию, которые в наибольшей степени соответствуют перечисленным выше особенностям ранних стадий разработки технических систем, позволяют объединить в целевых функциях эффективности их внутренние проектные параметры с выходными показателями функционирования и, одновременно, учесть вероятностный характер протекающих в подобных системах процессов [5]. Аналитическое моделирование, широко используемое на ранних стадиях проектирования, в этом случае связано с разработкой математических моделей, в явном виде связывающих основные (внутренние) конструктивно-компоновочные параметры с некими внешними (начальными) условиями и искомыми выходными характеристиками проектируемого производства. Такие

модели, составленные с использованием различных математических методов, например, на основе теории массового обслуживания, позволяют, правда, с некоторыми допущениями, учесть случайный во времени характер протекающих в системах технологических процессов и операций, но их, однако, удастся получить только для сравнительно простых объектов. Имитационное моделирование дает возможность воссоздать во времени процесс работы производственной системы, воспроизводя элементарные операции ее функционирования (технологические, загрузочно-разгрузочные, транспортные) с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени. Это позволяет по исходным данным получить сведения о состоянии системы в любой момент времени, а также оценить ее выходные характеристики. Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим в таких условиях является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют, в частности, более точно, чем при аналитическом моделировании, учесть многочисленные случайные факторы, характерные, например, для гибкого многономенклатурного производства. Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование при анализе и синтезе технических систем позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного. При этом производится предварительная декомпозиция процесса функционирования производственной системы на составляющие подпроцессы, и для тех из них, где это возможно, используются аналитические модели, а для остальных строятся имитационные. Такой комбинированный подход позволяет охватить класс сложных систем, которые не могут быть исследованы другими средствами.

Оценка результатов моделирования После завершения проектирования возникает вопрос об оценке достоверности полученных результатов. Поскольку, как уже отмечалось, постановка комплексного натурного эксперимента при проектировании сложных технических систем на ранних стадиях разработки практически исключена по экономическим соображениям, наиболее удобным, простым и доступным представляется выполнение моделирования проектируемого объекта альтернативными методами с последующим сравнением результатов. Можно, например, сравнить результаты аналитического моделирования, выполненного различными математическими методами, либо результаты аналитического и имитационного моделирования и определить относительную погрешность моделирования. Как правило, сравниваются средние значения наиболее важных показателей эффективности функционирования проектируемой системы, таких, например, как средняя длина очереди, коэффициент загрузки обслуживающего устройства, коэффициент простоя оборудования и т.п. В результате определяется относительная погрешность ϵ_M моделирования для некоего сравниваемого показателя M , (1) где $M_{ан}$ - среднее значение показателя M , определенное аналитически; $M_{им}$ -

тот же показатель, полученный в результате альтернативного имитационного моделирования. По величине погрешности можно косвенно судить о точности использованных методов, моделей и достоверности полученных результатов. К математическим моделям технических систем обычно предъявляются традиционные требования: высокая точность, экономичность, универсальность. Эти требования являются в значительной степени противоречивыми, поэтому в рассматриваемой ситуации необходимо находить удачные компромиссные решения. При выборе иерархического уровня моделей (микроуровень, макроуровень, метаяуровень) на ранних стадиях проектирования наиболее предпочтительным представляется метаяуровень, позволяющий укрупненно рассмотреть объект и определить его организацию, структуру и основные конструктивные параметры, то есть решить задачу ранних стадий разработки. В качестве математического аппарата можно использовать обыкновенные дифференциальные уравнения, теорию массового обслуживания, элементы дискретной математики (например, сети Петри). При этом, как уже отмечалось, возможны как аналитические подходы, так и использование имитационного моделирования, когда процессы в системе исследуются во времени при заданных внешних воздействиях. Выбор типа модели, наиболее эффективной в условиях конкретной задачи проектирования, определяется ее организационной, конструктивной и технологической сущностью, формой, объемом и особенностями представления исходной информации, общей целью исследования и т. д. Стратегической задачей подобного моделирования является, в общем случае, обеспечение максимальной эффективности проектируемой технической системы. Процедура разработки математической модели на ранних стадиях проектирования технической системы включает, таким образом, следующие этапы: 1. Сбор исходной информации о свойствах объекта. 2. Выбор характеристик и параметров, которые подлежат отражению в модели. 3. Выбор вида и синтез структуры математической модели, то есть получение общего вида математических соотношений без конкретизации числовых значений входящих параметров. 4. Расчет числовых значений параметров модели и обработка результатов моделирования. 5. Оценка точности модели. С учетом вышеизложенного, к методам моделирования, которые представляются наиболее подходящими для решения задачи проектирования технологических систем на ранних стадиях разработки, относятся: математические модели с использованием целочисленного программирования; математические модели с использованием сетей Петри; математические модели с использованием систем массового обслуживания; имитационные модели [1]. Рассмотрим особенности применения некоторых из них. Аналитические модели на основе систем массового обслуживания Модели массового обслуживания могут быть использованы на ранних стадиях разработки технологических систем различного назначения для выбора эффективного (оптимального по принятым

критериям) варианта. Использование таких моделей применимо к системам, функционирующим по типу марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем. Этим системам присущи формальные признаки, к которым относятся[3]:

- Наличие объектов, требующих обслуживания;
- Наличие одного или нескольких приборов обслуживания;
- Случайный характер протекающих в системе процессов.

Если проектируемая технологическая система соответствует всем перечисленным признакам, создается аналитическая модель массового обслуживания, связывающая ее выходные характеристики (например, производительность, экономическая эффективность и пр.) с основными конструктивными, структурно-компоновочными и эксплуатационными параметрами. Эти характеристики и параметры объединяются в целевую функцию, после чего решается, например, задача оптимизации. Рассмотрим в качестве примера технологическую систему, в которую поступает неограниченный по своим возможностям поток требований на обслуживание (например, поток деталей для обработки на станках). При этом система состоит из конечного числа станков, каждый из которых способен одновременно обрабатывать только одну деталь. Если все станки заняты, то вновь поступившие детали становятся в очередь и находятся в ней, пока один из станков не освободится. Функционирование системы рассматривается при условии поступления в нее пуассоновского потока требований, неограниченного по своим возможностям и имеющего плотность λ . Время обслуживания каждого требования $t_{обс}$ является случайной величиной, которая подчиняется показательному закону распределения с параметром m . Все станки обладают одинаковой производительностью. Возможные состояния такой СМО в процессе ее функционирования описываются системой дифференциальных уравнений (2) где P_0 - вероятность того, что в системе нет требований, P_k - вероятность того, что в системе k требований, λ - плотность входящего потока, μ - интенсивность обслуживания, n - число приборов обслуживания. Решая систему дифференциальных уравнений (2), можно получить переходный процесс работы СМО при различных начальных условиях, определяемых конкретными значениями величин λ , μ , n . При анализе производственных систем интерес обычно представляет установившийся режим их работы, соответствующий стационарному состоянию системы, при котором в этом случае система дифференциальных уравнений преобразуется в систему алгебраических (3) Из системы алгебраических уравнений (3) можно получить расчетные зависимости для определения показателей работы проектируемой системы. Результаты расчета некоторых параметров работы системы приведены в табл. 1, а зависимость среднего количества деталей M , ожидающих обработки, от среднего времени обработки $t_{обс}$, показана на рис. 1. Расчеты были выполнены для различных значений среднего времени обработки деталей (от 6 до 11 мин.). Рассмотренный подход характерен для ранних стадий проектирования,

поскольку позволяет выбрать оптимальный вариант из нескольких конкурирующих с использованием экономического критерия Таблица 1 - Результаты расчета параметров системы ,мин М 6 0.545 0.4546 0.04 0.4546 0.5454 7 0.636 0.3637 0.12 0.3637 0.6363 8 0.727 0.2728 0.17 0.2728 0.7272 9 0.818 0.1819 0.21 0.1819 0.8181 10 0.909 0.0909 0.54 0.0909 0.9091 11 1.000 0.0455 2.11 0.0455 0.9545 t обс М Рис. 1 - Зависимость средней длины очереди деталей М от среднего времени обработки деталей t обс Имитационные модели Имитационное моделирование можно с успехом использовать на ранних стадиях проектирования и исследования сложных технических систем, поскольку оно, в частности, позволяет оценить влияние вида закона распределения случайных во времени процессов, протекающих в системе, на выходные показатели ее работы, что затруднительно при аналитическом моделировании. Рассмотрим в качестве примера гибкую производственную систему, которая включает m станков. Время обработки деталей на станках подчиняется: 1) экспоненциальному, 2) нормальному и 3) равномерной плотности законам распределения со средним значением $t_{обр} = 10$ мин. Обслуживание станков выполняется транспортной тележкой. Тележка забирает со станка обработанную деталь, отвозит ее на склад, забирает на складе заготовку и доставляет ее на станок. Если тележка занята, станок «становится» в очередь и ожидает, пока тележка освободится. Время транспортной операции (оно же время обслуживания) подчиняется закону равномерной плотности со средним значением $t_{обс} = 3 \pm 2$ минуты. Требуется решить задачу для трех вариантов законов распределения времени обработки и определить основные показатели эффективности работы системы за время моделирования, равное 5000 единицам, меняя число станков $3 \leq m \leq 10$ (табл. 2).

Таблица 2 - Исходные данные задачи Вар Закон распределения Число станков m
Время трансп. операции., мин. 1 Экспонен- циальный $3 \leq m \leq 10$ 3 ± 2 2
Нормальный $3 \leq m \leq 10$ 3 ± 2 3 Равномерной плотности $3 \leq m \leq 10$ 3 ± 2 Задачу решим с помощью имитационной модели, составленной на языке моделирования GPSS/PC, упрощенная структурная схема которой показана на рис. 2. Рис. 2 - Структурная схема имитационной модели проектируемой системы Имеем замкнутую систему с конечным числом m источников требований на обслуживание. Тип распределения времени обработки задаем в блоке ADVANCE условным именем NAME, конкретизируя его в каждом варианте именем соответствующей функции. Возврат требований в замкнутую систему (цикл) организуем блоком TRANSFER. По результатам имитационного моделирования были определены основные выходные показатели функционирования исследуемой станочной системы. Из результатов следует, что тип закона распределения времени обработки деталей в системе оказывает существенное влияние на выходные показатели ее функционирования. График зависимости одного из таких показателей - коэффициента загрузки транспортной тележки K от числа станков m для трех вариантов законов распределения показан на рис.

З. экспоненциальный закон распределения нормальный закон распределения равномерный закон распределения

З	4	5	6	7	8	9	10	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
m	3	4	5	6	7	8	9	10	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Рис. 3 - Зависимость коэффициента загрузки транспортной тележки K от числа станков m

Наилучшая пропускная способность (производительность) системы обеспечивается при нормальном, а наихудшая - при экспоненциальном распределении, что вполне соответствует теории [4].

Оптимизация и оценка эффективности проектных решений по результатам моделирования

На ранних стадиях разработки производственно-технических систем обычно отсутствует полная и достоверная информация о затратах. В таких условиях не оправданы чисто экономические методы оценки эффективности, предусматривающие подсчет и анализ денежных показателей. Здесь целесообразна укрупненная оценка, направленная на выбор производственного варианта из большого числа практически реализуемых конкурирующих вариантов. При этом необходимо стремиться к максимально простым расчетным зависимостям, учитывая возможную недостоверность исходных данных. При оценке конкурирующих вариантов систем могут быть использованы различные критерии, однако основным источником получения экономического эффекта от производственной технологической системы в рассматриваемых условиях обычно является выигрыш по производительности. Прогнозирование показателей капитальных и текущих затрат на реализацию конкретного варианта целесообразно на ранних стадиях производить укрупненно, по возможности, как вероятностных величин. Для упрощения все затраты целесообразно задавать не в абсолютном (денежном), а в относительном выражении с использованием безразмерных коэффициентов. Задачу оптимизации в этом случае можно решить следующим образом: составить целевую функцию эффективности Δ , связывающую показатели производительности данного проектного варианта с его основными конструктивными параметрами x , варьируя параметром x , в наибольшей степени влияющим на производительность, найти экстремальное значение этой однопараметрической функции, которое соответствует оптимальному значению варьируемого конструктивного параметра x_{opt} , т.е. максимум функции Δ , (4) где Δ - экономический эффект от реализации проектного варианта. Рассмотренный подход не исключает также решения задачи многопараметрической оптимизации, для чего важнейшие проектные параметры x_i объединяются в целевую функцию качества $F(x)$ с использованием аддитивного критерия, (5) где $F(x)$ - целевая функция качества (например, суммарная стоимость потерь в системе, как функция ее основных параметров); w_i - весовые коэффициенты, определяющие степень важности i -го параметра. Тогда формальная постановка задачи параметрической оптимизации может быть сформулирована следующим образом: найти максимум (минимум) целевой функции $F(x)$ в некоторой области работоспособности XP , определяемой заранее заданными ограничениями $G(x)$. (6)

Для решения задачи (6) обычно используются различные методы поисковой

оптимизации. Значения ограничений вытекают из конкретной физической и технической сущности проектных параметров и могут быть определены с учетом данных о действующих производственных аналогах. Решение задачи (6) позволяет получить оптимальный проектный вариант производства в виде вектора оптимальных номинальных значений рассматриваемых конструктивных параметров. Ему должна предшествовать разработка соответствующих прикладных программ и использование средств автоматизации проектирования. Следует, однако, заметить, что на ранних стадиях проектирования использование многопараметрической оптимизации не всегда оправдано, поскольку требует достаточно трудоемкой разработки математического и программного обеспечения и больших затрат вычислительных ресурсов, связанных с реализацией итерационного процесса проектирования, особенно при большой размерности задачи, тогда как ценность полученного решения не всегда бывает велика из-за низкой достоверности исходной информации. Поэтому часто можно ограничиться решением значительно менее трудоемких задач однопараметрической оптимизации вида (4). В качестве примера рассмотрим целевую функцию [5], составленную для решения задачи оптимизации параметров автоматической линии, предназначенной для обработки детали «шестерня» и включающей токарный и зубофрезерный автоматы, межстаночный накопитель и необходимое вспомогательное оборудование для транспортировки, загрузки и разгрузки деталей. При решении задачи оптимизации могут быть использованы различные критерии (производительность, надежность, стоимость и пр.). Выберем в качестве критерия экономическую эффективность. Целевая функция в этом случае будет иметь следующий вид , где E - экономический эффект от работы линии за смену; P - сменная производительность (выработка); C - прибыль от реализации одного готового изделия (шестерни); Tr_1 - среднее время работы за смену первого агрегата (токарного); Tr_{p1} - время простоев за смену первого агрегата; Tr_2 - среднее время работы за смену второго агрегата (зубофрезерного); Tr_{p2} - время простоев за смену второго агрегата; S - емкость накопителя; q_{p1} - стоимость эксплуатации первого агрегата в единицу времени; q_{pr1} - стоимость простоев первого агрегата в единицу времени; q_{p2} - стоимость эксплуатации второго агрегата в единицу времени; q_{pr2} - стоимость простоев второго агрегата в единицу времени; q_{ps} - стоимость содержания и эксплуатации одной ячейки накопителя за смену. Стоимостные показатели q_i были в данном случае заданы в виде относительных безразмерных коэффициентов, что удобно для укрупненных расчетов на ранних стадиях проектирования. Для принятых исходных данных при стоимостных коэффициентах $q_{p1} = 1,2$; $q_{pr1} = 0,5$; $q_{p2} = 1,5$; $q_{pr2} = 0,7$ и $q_{ps} = 1,5$ оптимальная емкость накопителя, соответствующая максимальному значению эффективности E , составила $S_{opt} = 4$ места, (рис.4). Рис. 4 - Зависимость эффективности E автоматической линии от емкости накопителя S

Рассмотренные в статье методы математического моделирования, которые могут быть реализованы как в аналитической, так и имитационной форме, позволяют на ранних стадиях разработки, когда в условиях недостатка исходной информации принимаются наиболее ответственные проектные решения, по принятым критериям обоснованно выбрать основные конструктивные, структурные и компоновочные параметры сложных технических объектов и систем. В дальнейшем, на более поздних этапах проектирования, по мере появления уточняющей информации, эти параметры могут быть скорректированы, при этом, однако, основные проектные решения, как правило, сохраняются.