

Введение Сложные по структуре и организации системы, работающие в различных отраслях человеческой деятельности, в том числе в сфере техники и производства, часто функционируют по типу систем массового обслуживания (СМО) [1]. Процессы, протекающие в системах массового обслуживания, могут иметь самую разную физическую природу, однако, при всем различии, их объединяют некоторые общие формальные признаки, позволяющие использовать для их описания единый математический аппарат теории массового обслуживания. Обычно целью исследования подобных систем является установление количественных зависимостей между интенсивностью входящего потока заявок, требующих обслуживания, внутренними проектными параметрами системы, например, числом обслуживающих устройств и их производительностью и выходными характеристиками системы, такими, например, как ее пропускная способность, длина очередей на обслуживание, загрузка обслуживающих устройств и т.д. [2]. При этом важна точность используемых математических моделей, позволяющая избежать грубых просчетов, поскольку СМО являются в большинстве случаев дорогостоящими объектами, поэтому оптимизация их структуры и основных конструктивных параметров с использованием моделирования - весьма важная и актуальная задача, которая возникает на ранних стадиях проектирования и предполагает детальное изучение моделируемых явлений, их точную формализацию и алгоритмизацию. Для решения рассматриваемой задачи возможно использование как аналитических, так и имитационных методов моделирования, которые достаточно хорошо известны [3]. Однако, в большинстве случаев, при проектировании ограничиваются моделированием стационарного установившегося режима, который наступает при сравнительно длительной работе системы. По результатам подобного моделирования и принимаются, как правило, основные проектные решения. Поскольку системы массового обслуживания представляют собой функционирующие во времени динамические системы, в них, как в любых динамических системах, периодически возникают переходные процессы [4]. Причинами появления переходных процессов, в частности, в производственных системах, являются различные внешние возмущения режима их функционирования, которые могут быть вызваны как техническими, так и организационными факторами (включения, отключения, коммутации, отказы оборудования, его настройка, начало и окончание смены, перерывы на обед и т. п.). Переходный процесс возникает, длится какое-то время и затем затухает, после чего система переходит в стационарный установившийся режим работы, характеристики которого уже практически не будут зависеть от времени, однако, при очередном внешнем возмущении снова возникает переходный режим и ситуация повторяется. Таким образом, работа системы массового обслуживания во времени независимо от ее физической сущности и назначения обычно представляет собой чередование

установившихся режимов с переходными процессами, периодически возникающими при каждом внешнем возмущении (рис. 1). Π Рис. 1-
Функционирование системы массового обслуживания во времени При этом возникает вопрос, насколько велика доля переходных процессов $t_{\text{в}}$ в общем времени работы системы, насколько часто они появляются и как сильно отклоняется значение исследуемого параметра Π в переходном режиме от его установившегося значения, то есть можно ли при расчетах игнорировать влияние переходных процессов на выходные характеристики работы системы и не снизит ли это точности проектирования. Поскольку на практике по различным перечисленным выше причинам возможны случаи, когда система работает ограниченное, сравнительно небольшое время, может возникнуть ситуация, при которой динамический переходный процесс полностью не установится, либо его продолжительность составит значительную часть времени работы системы. В этом случае выходные характеристики системы могут существенно отличаться от тех, которые получены для стационарных условий. В подобных ситуациях требуются дополнительные исследования, позволяющие проверить, можно ли не учитывать переходной режим и пользоваться в расчетах более простым математическим аппаратом для условий установившегося процесса и какие при этом могут быть ошибки. Целью настоящей работы является дальнейшее развитие научно-методологических подходов к проектированию сложных технических систем в части исследования протекающих в них переходных процессов. Для достижения указанной цели необходимо решение следующих задач:

- Выбор метода моделирования, пригодного для описания рассматриваемого типа технической системы, а также для исследования переходных процессов в ней;
- Решение задачи моделирования и исследования переходных процессов на конкретных примерах функционирования информационных систем;
- Обработка результатов моделирования и оценка качества полученных переходных процессов (их формы, продолжительности, отклонения от установившихся значений);
- Обобщение результатов моделирования, разработка практически важных выводов и рекомендаций.

Исследование переходных процессов Для оценки переходных процессов в динамических системах обычно применяют анализ динамических характеристик, позволяющий определить их форму, продолжительность (время установления), величину отклонения исследуемого параметра системы от его установившегося значения и другие показатели качества. При этом возможно использование аналитических методов теории массового обслуживания, недостатком которых является ряд традиционных допущений, характерных для аналитических моделей, что в некоторой степени ограничивает возможности их применения. Альтернативой является использование методов имитационного моделирования, свободного от допущений, свойственных аналитическим моделям, а также позволяющего решить более сложные задачи. Рассмотрим применение

перечисленных методов на конкретных примерах моделирования переходных процессов в технических системах. Пример 1. На станок через случайные промежутки времени $t_{вх}$ поступает поток заготовок, требующих обработки. Этот поток считаем простейшим пуассоновским с интенсивностью поступления задач λ . Среднее время обработки также является случайной величиной и составляет $t_{обс}$. Если станок занят, заготовки ожидают обслуживания в очереди. Требуется исследовать переходный процесс, возникающий в системе. В данном случае имеем разомкнутую одноканальную систему массового обслуживания с ожиданием. Считая входящий поток требований простейшим, а время обслуживания - случайной величиной, которая подчиняется показательному закону распределения с параметром μ , опишем возможные состояния такой СМО в процессе ее функционирования системой дифференциальных уравнений [5] (1) где P_0 , P_k - вероятности состояний, когда в системе нет ни одного или k требований, n - число приборов обслуживания; λ - плотность входящего потока требований μ - интенсивность обслуживания, α - параметр системы. Решая систему дифференциальных уравнений (1), можно получить переходный процесс работы СМО при различных начальных условиях, определяемых конкретными значениями величин λ , μ , n . Стационарное состояние рассматриваемой системы можно получить, принимая $\frac{dP_k}{dt} = 0$. При этом система дифференциальных уравнений (1) преобразуется в систему алгебраических уравнений, из которой можно получить зависимости для расчета показателей работы системы в установившемся режиме. Моделирование выполнялось для параметров $\alpha = 0,7$; $n = 1$ и $\lambda_2 = 2 \lambda_1$. В результате были получены графики переходных процессов для ряда выходных характеристик рассматриваемой системы. Время работы системы было выражено в относительных единицах. За единицу измерения принято среднее время обслуживания (обработки деталей) $t_{обс}$. В результате моделирования было установлено, что переходные процессы в рассматриваемой системе для основных выходных характеристик имеют колебательную форму и затухающий характер. Форма переходных процессов, построенных для одной из этих характеристик - коэффициента использования (загрузки) станка $K_{исп}$ для различных значений параметра λ показана на рис. 2. $K_{исп} \lambda_1 \lambda_2 T = t/t_{обс}$ Куст 0 5 T 10 T 0,5 1,0 σ Рис. 2 - Переходные процессы в разомкнутой системе с ожиданием. Было также определено значение данного коэффициента $K_{уст}$ при установившемся режиме работы. Как видно из графика, длительность T_i отклонение характеристики от установившегося значения достаточно велики и зависят от интенсивности λ поступающих в систему заявок на обслуживание. Так, при интенсивности входящего потока λ_1 максимальное отклонение исследуемого параметра $K_{исп}$ от его установившегося значения превышает 30 процентов, а продолжительность переходного процесса при интенсивности λ_2 составляет более $15 t_{обс}$. В этом случае если время обработки детали составляет, например, 5 минут, переходный процесс в станочной системе будет

длиться более часа. Полученные результаты говорят о том, что игнорирование учета влияния переходных процессов при определенном сочетании параметров в данном примере может привести к грубым ошибкам. Вместе с тем, методы аналитического моделирования, если использовать их для исследования переходных процессов, имеют ряд недостатков. С их применением невозможно моделировать работу систем сложной организации и структуры. Традиционные для теории массового обслуживания допущения о простейшем пуассоновском входящем потоке и показательном времени операций обслуживания также часто не соответствуют реальным процессам, что приводит к снижению точности расчетов. В такой ситуации более предпочтительным для исследования динамики систем представляется использование имитационного моделирования, которое обеспечивает более высокую точность результатов, а также возможность решения более сложных задач. Кроме того, имитационные модели позволяют задавать различные законы распределения входящего потока, операций обслуживания, а также учитывать многочисленные случайные факторы, характерные для работы реальных технических систем любой структуры и сложности [6]. Рассмотрим использование методов имитационного моделирования для исследования переходных процессов на конкретном примере. Пример 2. На вычислительный комплекс, управляющий технологическим процессом, с конечного числа датчиков поступает порциями изменяющаяся во времени информация, нуждающаяся в обработке. Эта информация образует входящий поток, который подчиняется нормальному закону распределения со средним значением $t_{вх}$. Время обработки поступающей порции информации также случайное и зависит от ее особенностей. Пусть оно подчиняется закону распределения равномерной плотности со средним значением $t_{обс}$. Застав обслуживающий вычислительный комплекс занятым, поступившая порция информации ожидает его освобождения. Однако со временем информация устаревает и теряет свое значение. В частности, если время ожидания информации в очереди $t_{ож}$ превышает некоторую величину $t_{мах}$, информация считается потерянной. Требуется выполнить имитационное моделирование системы, определить характеристики ее функционирования и оценить, насколько вероятна потеря информации, в частности, при переходных процессах, периодически возникающих в системе. В отличие от примера 1, имеем замкнутую систему массового обслуживания. В данной задаче входящий в систему поток требований не является пуассоновским, а время обслуживания не подчиняется показательному закону распределения, что не позволяет использовать аналитические методы моделирования. Для решения задачи используем имитационное моделирование на языке GPSS, который хорошо приспособлен для описания технических систем. Программы моделирования на GPSS позволяют исследовать переходные процессы с высокой точностью благодаря выдаче промежуточных результатов с любым, в том числе мелким

шагом. В процессе моделирования были определены значения выходных показателей функционирования системы в переходном режиме. Моделирование продолжалось до завершения переходного процесса и выполнялось для следующих значений исходных параметров: $m = 3 - 7$; $\alpha_1 = 0,5$; $\alpha_2 = 0,9$. Упрощенная структурная схема имитационной модели системы показана на рис. 3, а полученные в результате моделирования графики переходных процессов, показывающие изменение в динамическом режиме одной из выходных характеристик системы $t_{ож}$ - времени ожидания требования (порции информации) в очереди - на рис. 4. Были также вычислены установившиеся значения данной характеристики $t_{уст}$ для различных значений параметра системы α . Как и в предыдущем примере 1, время работы системы здесь задано в относительных единицах. Из графиков видно, что переходные процессы, особенно при значении параметра $\alpha = 0,9$, имеют существенную продолжительность и большое отклонение от установившегося значения (перерегулирование σ составляет более 30 %). Это может привести к выходу времени ожидания обслуживания в исследуемой технической системе за предельное значение t_{max} и потере информации, что свидетельствует о недопустимости игнорирования переходных процессов в данной задаче. Анализ результатов моделирования и исследования переходных процессов в рассматриваемых примерах позволяет сделать следующие практически важные выводы: 1. Переходные процессы в исследованных технических системах, рассмотренных в примерах 1 и 2, являются колебательными по форме и затухающими во времени. 2. Продолжительность переходных процессов до наступления установления в ряде случаев значительна и зависит от ряда факторов, главным образом от интенсивности поступления требований на обслуживание λ и параметра системы α . С увеличением указанных параметров время переходных процессов увеличивается. Влияние числа источников требований m в замкнутой системе на длительность переходных процессов невелико. Обработка порции информации

Задание функции распределения
Генерирование входящего потока
Установка информации в очередь
Освобождение вычислительного комплекса
FUNCTION GENERATE QUEUE ADVANCE
SEIZE DEPART ADVANCE RELEASE TRANSFER
Параметры входящего потока
Занятие комплекса
Выход порции информации из очереди
Возврат требований в систему
Обработка информации

Рис. 3 - Структурная схема имитационной модели 3.

Максимальная величина отклонения графиков переходных процессов от их установившихся значений (перерегулирования) также велика (превышает 30 процентов). Для исследованных характеристик в замкнутой системе перерегулирование возрастает с увеличением параметра системы α , а в разомкнутой возрастает с уменьшением параметра входящего потока λ . Полученные в статье результаты позволяют утверждать, что переходные процессы, возникающие в технических системах, функционирующих по типу

систем массового обслуживания, при определенном сочетании параметров этих систем оказывают существенное влияние на выходные показатели работы систем, поскольку значения, которые принимают эти показатели в период прохождения переходных процессов, могут сильно отличаться от значений аналогичных показателей, найденных для установившихся режимов. В таких условиях при практических расчетах, особенно для систем, работа которых по разным причинам длится ограниченное время либо сопровождается частыми отключениями, остановками, коммутациями и другими внешними возмущениями, учет влияния переходных процессов обязателен.

$T = t/t_{обс}$ t_{max} $t_{уст 2}$ $t_{уст 1}$ $\alpha 2$
 $= 0,9$ $\alpha 1 = 0,5$ σ $t_{ож}$ 5 10 0

Рис. 4 - Переходные процессы в замкнутой системе

Рассмотренная методика моделирования универсальна и позволяет исследовать особенности переходных процессов в технических системах различного назначения и структуры.