

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕРВИСНОЙ СИСТЕМЫ

В качестве математической модели территориально распределенных сервисных систем предлагается адаптированная модель системной динамики производственно-бытового предприятия. Предложенная модель позволяет получить оценки характеристик динамики функционирования объекта при относительно быстром изменении спроса на обслуживание. Приведены результаты моделирования территориально распределенного сервисного объекта.

Ключевые слова: территориально распределенные обслуживающие системы, имитационное моделирование, математическая модель, системная динамика, переходной процесс, колебания спроса.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы и анализ литературы. В современных условиях непрерывного повышения сложности выполняемых функций, требований к качеству функционирования оперативных сервисных систем (скорая медицинская помощь, ремонтные службы, пожарная охрана, ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций), изменений требований обслуживаемых объектов неизбежно возникают проблемы их адаптации и реинжиниринга. Основу этих проблем составляют задачи оптимизации их структуры, топологии, параметров и технологии функционирования, которые решаются методами математического программирования и моделирования [1]. Ввиду сложности совместного решения на практике задачи оптимизации сервисных систем и анализа процессов их функционирования решаются, как правило, отдельно, что снижает качество проектных решений [2–8]. При этом, кроме традиционных задач для

оперативных сервисных систем представляют повышенный интерес задачи моделирования процессов их функционирования в условиях быстрых изменений спроса на обслуживание.

Среди основных подходов, используемых для исследования процессов функционирования сервисных систем, наибольшее распространение получили [9]: дискретно-событийный, системной динамики, мультиагентный. В рамках первого подхода модели массового обслуживания реализуются языками высокого уровня или имитационного моделирования (GPSS W, Arena, SimProcess) [4]. Методология системной динамики [10, 11] положена в основу пакетов программ STELLA, Powersim, Vensim. Технология агентного моделирования реализуется специализированными программными комплексами StarLogo, NetLogo, AnyLogic.

Несмотря на многочисленные публикации, подходы к практическому решению задач моделирования дина-

мики сервисных систем в литературе освещены недостаточно. На основе анализа публикаций установлено, что наиболее перспективным при решении задач адаптации и реинжиниринга оперативных сервисных систем является использование методологии системной динамики.

Объектом исследования является оперативные сервисные системы.

Предмет исследования – переходные процессы при изменении спроса на обслуживание в оперативных сервисных системах.

Цель статьи – разработка математической модели анализа динамики оперативных сервисных систем, ориентированной на использование в технологиях их реинжиниринга.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Постановка задачи. В статье рассматривается трехуровневая территориально распределенная сервисная система, состоящая из центра, зональных узлов и элементов. Такая структура характерна для большинства оперативных служб (скорая медицинская помощь, ремонтные службы, пожарная охрана, силы гражданской защиты). В центр от подконтрольных объектов поступают заявки на обслуживание. После предварительной обработки в центре, заявки пересылаются в территориальное звено узлов, в котором расположены мобильные ресурсы (бригады скорой помощи, ремонтные бригады, пожарно-спасательные расчеты) для их обслуживания в местах возникновения. При недостаточном количестве ресурсов в территориальном узле инициируется запрос в центр на дополнительные ресурсы. В центральном пункте такой запрос обеспечивается штатными ресурсами центра, а в случае их нехватки происходит мобилизация дополнительных ресурсов.

Необходимо разработать модель динамики функционирования сервисной системы в условиях относительно быстрых изменений спроса на обслуживание, что соответствует возникновению чрезвычайных ситуаций. При этом модель должна давать возможность отслеживать изменение характеристик процесса функционирования системы (время обслуживания, количество невыполненных заявок, использование ресурсов, других). Кроме того, она должна не только давать прогноз поведения системы при изменении интенсивности поступления заявок на обслуживание, но и быть удобной для решения задач совершенствования системы (оптимизация структуры, топологии, параметров, технологии функционирования).

Для решения данной задачи использована методология системной динамики, а в качестве базовой модели использована модель из [10]. При этом все элементы, территориальные узлы и центр путем агрегирования представлены тремя звеньями, а территориальная распределенность обслуживаемых объектов, центра, территориальных узлов и элементов системы учтена параметрами показательных запаздываний пересылки заявок и запаздываний перемещения ресурсов обслуживания (РО).

Модель состоит из диаграммы потоков (рис. 1) и системы уравнений. Диаграмма потоков отображает потоки ресурсов обслуживания, потоки заявок (спроса на ресурсы), а также информационные связи.

В системе уравнений каждая переменная модели обозначена мнемонически группой букв. Для звена элементов обслуживания последняя буква в каждом обозначении – е, для звена территориальных узлов – и, для звена центрального пункта – с. Для привязки ко времени используются два последовательных временных отрезка jk и kl (j – предыдущий момент времени, k – текущий, l – будущий). Нумерация уравнений дополнена обозначениями их типов, что определяет порядок их решения [10]: уравнения уровней (U), уравнения темпов (T), вспомогательные уравнения (V).

Система уравнений для звена элементов. Уравнения, описывающие объем невыполненных заявок и фактически доступных для обслуживания резервов РО в звене элементов (ЗЭ), имеют вид простейших уравнений уровня. Эти уравнения отражают тот факт, что действительный остаток определяется путем последовательного прибавления или вычитания количеств, определяемых темпами входящего и исходящего потоков заявок:

$$1-U: nze.k = nze.j + dt \cdot (pze.jk - oze.jk), \quad (1)$$

$$2-U: fine.k = fine.j + dt \cdot (pme.jk - oze.jk - tve.jk), \quad (2)$$

где nze – количество невыполненных заявок в ЗЭ; dt – шаг моделирования; pze – темп потока заявок в ЗЭ; oze – темп обслуживания заявок в ЗЭ; $fine$ – фактический резерв средств (РО) в звене элементов обслуживания; pme – темп потока заказанных ресурсов в ЗЭ; tve – темп возвращения излишних РО из ЗЭ.

Темп обслуживания зависит от количества невыполненных заявок и потребности в обслуживании. Для сохранения неотрицательных резервов РО используются два вспомогательных уравнения:

$$3-V: poze.k = nze.jk / zze.k, \quad (3)$$

$$4-V: doze.k = fine.k / dt, \quad (4)$$

$$5-T: oze.kl = \min\{poze.k, doze.k\}, \quad (5)$$

где $poze$ – предполагаемый темп обслуживания заявок; $doze$ – допустимый темп обслуживания заявок.

Время обслуживания в ЗЭ определим через отношение количества невыполненных заявок к количеству доступных ресурсов:

$$6-V: zze.k = \minze + usrze \cdot nnze.k / fine.k, \quad (6)$$

где $\minze$ – минимальное время обслуживания объектов; $usrze$ – условное среднее время обслуживания объектов; $nnze$ – нормальный уровень невыполненных заявок в ЗЭ.

Нормальный уровень невыполненных заявок определяется исходя из среднего уровня активности обслуживания и нормального запаздывания обслуживания заявок:

$$7-V: nnze.k = pze.jk \cdot (\minze + usrze). \quad (7)$$

Темп потока заявок на ресурсы обслуживания может быть принят равным потоку заявок от объектов:

$$8\text{-T: } mze.kl = pze.jk, \quad (8)$$

где mze – ресурсы, запрашиваемые звеном элементов у территориального звена.

Темп возвращения РО зависит от разницы нормального уровня невыполненных заявок и фактического резерва доступных РО и может быть представлен в виде:

$$9\text{-T: } tve.kl = \max\{0, (fme.k - nnze.k) / zrve\}, \quad (9)$$

где $zrve$ – время принятия решения о возвращении ресурсов.

Время оформления и пересылки заявок, а также перемещения ресурсов могут быть выражены с помощью пар уравнений показательных запаздываний:

$$10\text{-U: } zoe.k = zoe.j + dt \cdot (mze.jk - zve.jk), \quad (10)$$

$$11\text{-T: } zve.kl = fnzapN(mze.jk, zoe), \quad (11)$$

где zoe – количество заявок на стадии оформления в ЗЭ; zve – темп выдачи оформленных заявок ЗЭ; $fnzapN$ – функция запаздывания N -го порядка [10]; zoe – время оформления заказа на РО в звене элементов.

$$12\text{-U: } zpe.k = zpe.j + dt \cdot (zve.jk - pzu.jk), \quad (12)$$

$$13\text{-T: } pzu.kl = fnzapN(zve.jk, zpe), \quad (13)$$

где zpe – количество заявок на стадии пересылки из ЗЭ; pzu – темп потока заявок в звено узлов; zpe – время пересылки заявки из ЗЭ.

$$14\text{-U: } mote.k = mote.j + dt \cdot (ozu.jk - pme.jk), \quad (14)$$

$$15\text{-T: } pme.kl = fnzapN(ozu.jk, ztme), \quad (15)$$

$$16\text{-U: } move.k = move.j + dt \cdot (oze.jk + tve.jk - vme.jk), \quad (16)$$

$$17\text{-T: } vme.kl = fnzapN(oze.jk + tve.jk, zvme), \quad (17)$$

где $mote$ – ресурсы, направленные в ЗЭ; ozu – темп обслуживания заявок в звене узлов; pme – темп поступления ресурсов в ЗЭ; $ztme$ – время перемещения РО в ЗЭ; $move$ – ресурсы, отправленные и возвращаемые из ЗЭ; vme – темп доставки возвращаемых из ЗЭ ресурсов; $zvme$ – время возвращения ресурсов в территориальный узел.

Система уравнений для звена узлов. С точки зрения системной динамики часть процессов, протекающих в звене узлов (ЗУ), по своей сути аналогична процессам, протекающим в звене элементов. Это позволяет описывать подобные процессы аналогичными уравнениями.

Количества невыполненных заявок и фактически доступных к обслуживанию ресурсов в звене узлов определяются уравнениями:

$$18\text{-U: } nzu.k = nzu.j + dt \cdot (pzu.jk - ozu.jk), \quad (18)$$

$$19\text{-U: } fmu.k = fmu.j + dt \cdot (pmu.jk - ozu.jk + vme.jk - tvu.jk), \quad (19)$$

где nzu – количество невыполненных заявок в ЗУ; fmu – фактический резерв РО в ЗУ; pmu – темп потока ресурсов

в ЗУ; vme – возвращаемые ресурсы обслуживания из ЗЭ; tvu – темп возвращения РО из ЗУ в центральное звено.

Темп обслуживания заявок в ЗУ определяется аналогично (3)–(5):

$$20\text{-V: } pozu.k = nzu.k / zzu.k, \quad (20)$$

$$21\text{-V: } dozu.k = fmu.k / dt, \quad (21)$$

$$22\text{-T: } ozu.kl = \min\{pozu.k, dozu.k\}, \quad (22)$$

где $pozu$ – предполагаемый темп обслуживания заявок ЗУ; $dozu$ – допустимый темп обслуживания заявок ЗУ.

Время обслуживания заявок описывается уравнением:

$$23\text{-V: } zzu.k = \minzu + uszru \cdot jmu.k / fmu.k, \quad (23)$$

где $\minzu$ – минимальное время обслуживания заявок звеном узлов; $uszru$ – условное среднее время обслуживания заявок ЗУ; jmu – желательный резерв ресурсов обслуживания в ЗУ.

Желательный резерв принят пропорциональным среднему темпу поступления заявок:

$$24\text{-V: } jmu.k = kru \cdot upu.k, \quad (24)$$

где kru – коэффициент запаса ресурсов ЗУ; upu – усредненный поток заявок в ЗУ.

Средний темп поступления заявок в ЗУ определяем с помощью показательного усреднения первого порядка:

$$25\text{-U: } upu.k = upu.j + dt \cdot (pzu.jk - upu.jk) / kuu, \quad (25)$$

где kuu – параметр усреднения данных в ЗУ.

Темп возвращения ресурсов обслуживания из ЗУ зависит от разницы желательного и фактического запаса ресурсов обслуживания, а также от значения штатного уровня ресурсов узлов:

$$26\text{-T: } tvu.kl = \min\{\max\{0, (fmu.k - jmu.k) / zrvu\}, \max\{0, (fmu.k - smu.k) / zrvu\}\}, \quad (26)$$

где tvu – темп возвращения ресурсов из ЗУ; $zrvu$ – запаздывание решения о возвращении ресурсов из ЗУ; SMP – штатный уровень ресурсов ЗУ.

Расчетный темп заявок на РО звеном узлов предусматривает их пополнение до желательного уровня и компенсацию превышения уровнем невыполненных заявок своего нормального значения:

$$27\text{-V: } rmzu.k = 1 / zrzru \cdot [(jmu.k - fmu.k) + (nzu.k - nnzu.k)], \quad (27)$$

$$28\text{-T: } mzu.kl = \max\{0, rmzu.k\}, \quad (28)$$

где $rmzu$ – расчетный темп поступления заявок на ресурсы ЗУ; $zrzru$ – время принятия решения о запросе дополнительных ресурсов; $nnzu$ – нормальный уровень невыполненных заявок в ЗУ; mzu – темп выдачи заявок на ресурсы ЗУ.

Нормальный уровень невыполненных заявок может быть определен, исходя из среднего темпа поступления заявок и среднего времени их обслуживания:

$$29\text{-V: } nnzu.k = upu.k \cdot (\minzu + uszru). \quad (29)$$

Время оформления заявок, их пересылки, а также перемещения ресурсов обслуживания определяются выражениями:

$$30-U: zou.k = zou.j + dt \cdot (mzu.jk - zvu.jk), \quad (30)$$

$$31-T: zvu.kl = f_{\text{zapN}}(mzu.jk, zozu), \quad (31)$$

где zou – заказы на стадии оформления в ЗУ; zvu – темп выдачи оформленных заявок ЗУ; $zozu$ – время оформления заявок в ЗУ;

$$32-U: zpu.k = zpu.j + dt \cdot (zvu.jk - pzc.jk), \quad (32)$$

$$33-T: pzc.jk = f_{\text{zapN}}(zvu.jk, zpzu), \quad (33)$$

где zpu – заказы на стадии пересылки из ЗУ; pzc – поток заявок в центральное звено; $zpzu$ – время пересылки заявок из ЗУ;

$$34-U: motu.k = motu.j + dt \cdot (ozc.jk - pmu.jk), \quad (34)$$

$$35-T: pmu.kl = f_{\text{zapN}}(ozc.jk, ztmu), \quad (35)$$

$$36-U: movu.k = movu.j + dt \cdot (tvu.jk - vmu.jk), \quad (36)$$

$$37-T: vmu.kl = f_{\text{zapN}}(tvu.jk, ztmu), \quad (37)$$

где $motu$ – ресурсы, находящиеся в пути к ЗУ; ozc – темп обслуживания заявок центральным звеном; pmu – поток ресурсов обслуживания в ЗУ; $ztmu$ – время перемещения ресурсов в ЗУ; $movu$ – ресурсы, отправленные и возвращаемые из ЗУ; vmu – темп поступления в центральное звено ресурсов, возвращаемых ЗУ; $zvmu$ – время возвращения ресурсов из ЗУ в центральное звено.

Система уравнений для центрального звена. С точки зрения системной динамики часть процессов, протекающих в центральном звене (ЦЗ), по своей сути аналогична процессам, протекающим в звене элементов и звене узлов. Это позволяет описывать подобные процессы аналогичными уравнениями.

Количество невыполненных заявок и фактический резерв ресурсов обслуживания в ЦЗ определяются аналогично (1) и (2):

$$38-U: nzc.k = nzc.j + dt \cdot (pzc.jk - ozc.jk), \quad (38)$$

$$39-U: fmc.k = fmc.j + dt \cdot (mgc.jk - ozc.jk + vmc.jk - dmb.jk), \quad (39)$$

где nzc – уровень невыполненных заявок в ЦЗ; fmc – фактический уровень резервов ресурсов обслуживания в ЦЗ; mgc – темп потока мобилизованных ресурсов, готовых к транспортировке; dmb – темп демобилизации ресурсов обслуживания.

Темп обслуживания заявок в ЦЗ определяется аналогично (3)–(5) и (20)–(22):

$$40-V: pozc.k = nzc.k / zzc.k, \quad (40)$$

$$41-V: dozc.k = fmc.k / dt, \quad (41)$$

$$42-T: ozc.kl = \min \{ pozc.k, dozc.k \}, \quad (42)$$

где $pozc$ – предполагаемый темп обслуживания заявок ЦЗ; $dozc$ – допустимый темп обслуживания заявок ЦЗ.

Время обслуживания заявок определяется выражением:

$$43-V: zzc.k = \min zc + uszrc \cdot jmc.k / fmc.k, \quad (43)$$

где $\min zc$ – минимальное время обслуживания заявок ЦЗ; $uszrc$ – условное среднее время обслуживания заявок ЦЗ; jmc – желательный резерв ресурсов обслуживания в ЦЗ.

Желательный резерв ресурсов принят пропорциональным среднему темпу поступления заявок:

$$44-V: jmc.k = kpc \cdot upc.k, \quad (44)$$

где kpc – параметр, определяющий размер резервов ЦЗ; upc – усредненный поток заявок в ЦЗ.

Средний темп поступления заявок определяем показателем усреднения первого порядка:

$$45-U: upc.k = upc.j + dt \cdot (pzc.jk - upc.jk) / kuc, \quad (45)$$

где kuc – параметр (время) усреднения данных в ЦЗ.

Темп демобилизации определяется разницей фактического и желаемого уровней резервов РО, а также штатным уровнем ресурсов обслуживания в центральном пункте:

$$46-T: dmb.kl = \min \{ \max \{ 0, (fmc.k - jmc.k) / zdmdb \}, \max \{ 0, (fmc.k - smc.k) / zdmdb \} \}, \quad (46)$$

где dmb – темп демобилизации ресурсов; $zdmdb$ – время демобилизации ресурсов; smc – штатный уровень ресурсов обслуживания в ЦЗ.

Предполагаемый темп поступления заявок на мобилизацию ресурсов, выдаваемый ЦЗ и его допустимое значение определяются выражениями:

$$47-V: pmzc.k = 1 / zrzrc \cdot [(jmc.k - fmc.k) + (nzc.k - nnzc.k)], \quad (47)$$

$$48-V: dmzc.k = \max \{ 0, pmzc.k \}, \quad (48)$$

$$49-T: mzc.kl = \min \{ dmzc.k, ptm \}, \quad (49)$$

где $pmzc$ – предполагаемый темп поступления заявок на мобилизацию ресурсов; $zrzrc$ – время принятия решения о мобилизации ресурсов в ЦЗ; $nnzc$ – нормальный уровень невыполненных заявок в ЦЗ; $dmzc$ – допустимый темп поступления заявок на мобилизацию; mzc – темп поступления заявок на РО в ЦЗ; ptm – предельный темп мобилизации.

Нормальный уровень невыполненных заявок определяется, исходя из среднего темпа потока заявок и нормального времени обслуживания заявок:

$$50-V: nnzc.k = upc.k \cdot (\min zc + uszrc). \quad (50)$$

Запаздывания оформления заявок и мобилизации ресурсов обслуживания имеют вид показательных запаздываний N -го порядка:

$$51-U: zoc.k = zoc.j + dt \cdot (tmc.jk - zvc.jk), \quad (51)$$

$$52-T: zvc.kl = f_{\text{zapN}}(tmc.jk, zozc), \quad (52)$$

$$53-U: mmc.k = mmc.j + dt \cdot (zvc.jk - mgc.jk), \quad (53)$$

$$54\text{-}T: \text{mgc.kl} = \text{fnzapN}(\text{zvc.jk}, \text{zmmc}), \quad (54)$$

где zoc – заявки на стадии оформления в ЦЗ; zvc – темп выдачи оформленных заявок WP ; mmc – заявки на стадии мобилизации ресурсов; zmmc – время мобилизации PO .

Начальные значения переменных и значения параметров модели. Предполагается, что на начальном отрезке моделирования сервисная система работает в установившемся режиме. Определим начальные значения переменных через независимую переменную pze (спрос на обслуживание в ЗЭ). Начальное значение потока заявок:

$$55\text{-}N: \text{pze} = \text{pzei}, \quad (55)$$

где pzei – постоянная, определяющая начальное значение потока заявок.

В установившемся режиме количество невыполненных заявок равно его нормальному значению, а исходная величина фактических резервов соответствует нормальному уровню невыполненных заявок:

$$56\text{-}N: \text{nze} = \text{pze} \cdot (\text{minze} + \text{usrze}), \quad (56)$$

$$57\text{-}N: \text{fme} = \text{nze}. \quad (57)$$

Используя введенные исходные данные и разрешив соответствующие уравнения модели, получим следующие уравнения начальных условий:

$$58\text{-}N: \text{mze} = \text{pze}, \quad (58)$$

$$59\text{-}N: \text{zoe} = \text{zoze} \cdot \text{pze}, \quad (59)$$

$$60\text{-}N: \text{zpe} = \text{zpze} \cdot \text{pze}, \quad (60)$$

$$61\text{-}N: \text{mote} = \text{ztme} \cdot \text{pze}, \quad (61)$$

$$62\text{-}N: \text{move} = \text{ztme} \cdot \text{pze}, \quad (62)$$

$$63\text{-}N: \text{pzu} = \text{pze}, \quad (63)$$

$$64\text{-}N: \text{upu} = \text{pze}, \quad (64)$$

$$65\text{-}N: \text{nzu} = \text{upu} \cdot (\text{minzu} + \text{usrzu}), \quad (65)$$

$$66\text{-}N: \text{fmu} = \text{kpu} \cdot \text{upu}, \quad (66)$$

$$67\text{-}N: \text{mzu} = 0. \quad (67)$$

Подобным образом через значение mzu определяют переменные системы уравнений для ЗУ:

$$68\text{-}N: \text{zou} = \text{zozu} \cdot \text{mzu}, \quad (68)$$

$$69\text{-}N: \text{zpu} = \text{zpzu} \cdot \text{mzu}, \quad (69)$$

$$70\text{-}N: \text{motu} = \text{ztmu} \cdot \text{mzu}, \quad (70)$$

$$71\text{-}N: \text{movu} = \text{ztmu} \cdot \text{mzu}, \quad (71)$$

$$72\text{-}N: \text{tvu} = \text{mzu}, \quad (72)$$

$$73\text{-}N: \text{pzc} = \text{mzu}, \quad (73)$$

$$74\text{-}N: \text{upc} = \text{mzu}, \quad (74)$$

$$75\text{-}N: \text{nzc} = \text{upu} \cdot (\text{minzc} + \text{usrzc}), \quad (75)$$

$$76\text{-}N: \text{fmc} = \text{kpu} \cdot \text{upc}, \quad (76)$$

$$77\text{-}N: \text{mzc} = \text{mzu}, \quad (77)$$

$$78\text{-}N: \text{zoc} = \text{zozc} \cdot \text{mzu}, \quad (78)$$

$$79\text{-}N: \text{mmc} = \text{zmmc} \cdot \text{mzu}. \quad (79)$$

Порядок и параметры показательных запаздываний модели определяются путем решения задач параметрической идентификации. При решении контрольной задачи использованы такие значения параметров модели: $\text{minze} = 17$ мин, $\text{minzu} = 2$ мин, $\text{minzc} = 10$ мин, $\text{usrze} = 5$ мин, $\text{usrzu} = 8$ мин, $\text{usrzc} = 5$ мин, $\text{kpu} = 1$, $\text{kpc} = 1$, $\text{kuu} = 12$ мин, $\text{kuc} = 18$ мин, $\text{zrzu} = 10$ мин, $\text{zrzc} = 15$ мин, $\text{zoze} = 2$ мин, $\text{zozu} = 5$ мин, $\text{zozc} = 10$ мин, $\text{zpze} = 2$ мин, $\text{zpzu} = 5$ мин, $\text{ztme} = 7$ мин, $\text{ztmu} = 30$ мин, $\text{zrve} = 1$ мин, $\text{zrvu} = 1$ мин, $\text{zmmc} = 180$ мин, $\text{zdmB} = 30$ мин.

Штатные ограничения ресурсов на возвращение из звена: $\text{smu} = 80$ единиц, $\text{smc} = 100$ единиц. Предельный темп мобилизации ресурсов обслуживания в центре ptm принят равным 50 единицам. Шаг моделирования в соответствие с требованиями [10]: $\text{dt} = 0,05$ мин.

Пример. Моделирование системы в условиях кратковременного 100 %-ного увеличения спроса на обслуживание осуществлялось посредством специально разработанного программного средства. После инициализации переменных (55)–(79) с шагом dt решались уравнения системы (1)–(54) в предусмотренном методологией порядке: сначала U -уравнения, затем V -уравнения, затем T -уравнения. Увеличение спроса учитывалось в переменной pze :

$$\text{pze.kl} = \text{pzei} + \text{add},$$

где pzei – начальный темп поступления заявок на ресурсы обслуживания (5 единиц в минуту); add – внешнее воздействие ($\text{add} = \text{pzei} \cdot 100\%$). Длительность воздействия 60 мин, начало – в момент времени $t = 5$ мин.

В результате моделирования были получены следующие графики переходных процессов для темпов поступления заявок на ресурсы и темпов обслуживания (рис. 2); объемов невыполненных заявок и запаздывания их выполнения (рис. 3); фактически доступных для обслуживания ресурсов (рис. 4).

Ввиду запаздываний на оформление и пересылку заявок, поступающих от объектов обслуживания, увеличение темпа поступления заявок в звене узлов на 100 % наблюдается лишь спустя приблизительно 7 мин. При этом увеличение темпов обслуживания отстает более чем на 1 час, так и не успевая достичь 100 % до того, как начинает падать темп поступления заявок на обслуживание. В момент падения спроса темп обслуживания в ЗЭ скачкообразно возрастает, т. к. ресурсы в звене резко превышают востребованный резерв.

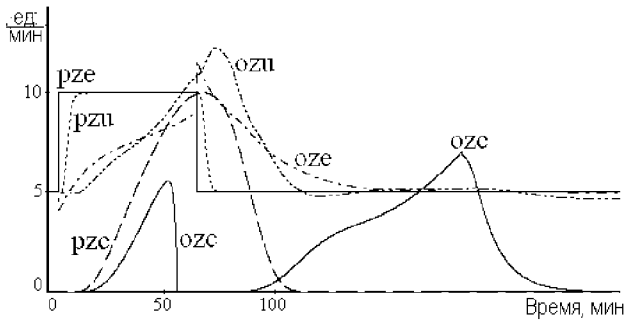


Рис. 2. Динамика темпов поступления и обслуживания заявок

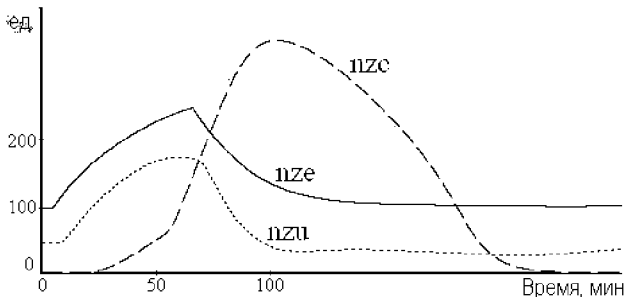


Рис. 3. Динамика количества невыполненных заявок

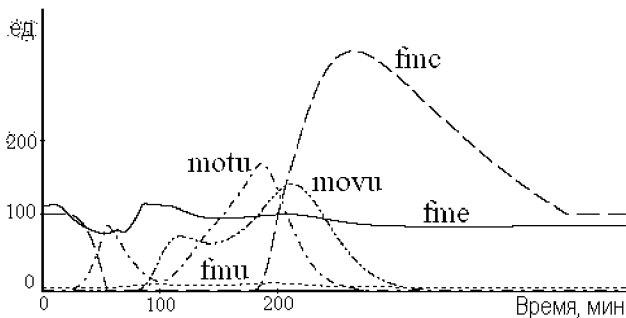


Рис. 4. Динамика фактически доступных для использования ресурсов

Невыполненные заказы в ЗЭ возрастают почти в 1,5 раза относительно начальных условий, а в ЗУ — более чем в 3 (рис. 3). Недостаточное количество РО в звене узлов инициирует поток заявок на мобилизацию РО в центральном звене. Причем запрос на мобилизацию увеличен относительно реальной потребности почти в 2,5 раза. Это связано с накоплением невыполненных заявок в ЗУ.

Количество штатных РО в центральном пункте (100 ед.) превысило заказ от звена узлов, поэтому фактические ресурсы центрального звена (изначально равные штатному количеству) сократились до нуля. Инициированный поток заявок на мобилизацию дополнительных РО на 200 минуте составил максимальные 1750 единиц (т.е. на порядок больше реально необходимого объема дополнительных РО в ЗЭ в момент повышенного спроса). Фактически мобилизованный объем РО в ЗЦ достиг максимального значения на 300 минуте и составил около 300 единиц РО. Это связано с запаздываниями получения информации о стабилизации спроса на всех уровнях.

ВЫВОДЫ

Предложена аналитико-имитационная модель системной динамики территориально распределенной сервисной системы. Модель может быть использована для исследования трехуровневых иерархических территориально распределенных сервисных систем путем ее программной реализации на языках общего назначения или в пакетах программ, ориентированных на математические вычисления. Она является эффективным средством для анализа нештатных ситуаций при организации и управлении скорой и неотложной медицинской помощью, ремонтными службами, пожарной охраной, ликвидацией последствий чрезвычайных ситуаций, обеспечением информационной безопасности. Использование предложенной модели позволит определить рациональные размеры ресурсов во всех звеньях оперативной сервисной системы, повысить точность прогнозирования последствий при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Направлением дальнейших исследований может стать интеграция разработанной модели в существующие и создаваемые средства проектирования, планирования развития, реинжиниринга и управления оперативными сервисными системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров, Э. Г. Территориально распределенные системы обслуживания / Э.Г. Петров, В.П. Пискалова, В.В. Бескоровайный. — К. : Техника, 1992. — 208 с.
2. Быченко, Н. Н. Об эффективности автоматизации управления региональной безопасностью / Н. Н. Быченко, В. И. Машкин // Кібернетика і обчислювальна техніка. Нові комп'ютерні засоби, обчислювальна техніка і мережі. — К. : 2001. — Т. 2 — С. 38–43.
3. Портер М.Э. Переосмысление системы здравоохранения / М.Э. Портер, Э. Ольмстед Тайсберг. — К. : Видавництво Олексія Капусти, 2007. — 620 с.
4. Петров, Э. Г. Модели приближенного оценивания структурно-топологических и параметрических характеристик территориально-распределенных систем обслуживания / Э.Г. Петров, А.Х. Баддур // Вестник Херсонского Национального технического университета. — 2011. — Вып. 41. — С. 328–334.
5. Комяк, В. М. Модель размещения пожарных депо в условиях неоднородности характеристик сельской местности / В.М. Комяк, А.Г. Косе // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. — 2010. — Вып. 28. — С. 106–113.
6. Андронов, В.А. Особливості розподілу адміністративно-територіальних одиниць за характером та кількістю оперативних завдань пожежно-рятувальних підрозділів / В. А. Андронов, Ю. П. Бабков // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. — 2010. — Вып. 28. — С. 9–14.
7. Кулешов, М. М. Удосконалення системи взаємодії під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій / М.М. Кулешов // Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. — 2008. — Вип. 8. — С. 103–108.
8. Шевченко, Л. П. Управление ликвидацией чрезвычайных ситуаций путем оптимального распределения и перераспределения ресурсов / Л. П. Шевченко, А. В. Пирогов // Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. — 2008. — Вип. 8. — С. 220–225.

9. Использование имитационного моделирования процессов в бизнесе / Ю. Р. Валькман, Е. В. Муцаковская // Моделирование та інформаційні технології: Зб. наук. пр. – К. : ПІМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2010. – Вип. 58. – С. 90–97.
10. Форрестер, Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / Дж. Форрестер : пер. с англ., общая редакция Д. М. Гвишиани. – М. : Прогресс, 1971. – 340 с.
11. Лычкина, Н.Н. Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития / Н.Н. Лычкина // Бизнес-информатика. – 2009. – № 3(09). – С. 55–67.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2012.

Безкорований В. В., Соболева О.В.

МОДЕЛЬ СИСТЕМОЇ ДИНАМІКИ ТЕРИТОРІАЛЬНО РОЗПОДІЛЕНОЇ СЕРВІСНОЇ СИСТЕМИ

В якості математичної моделі територіально розподілених сервісних систем пропонується адаптована модель системної динаміки виробничо-збутового підприємства. Розроблена модель дозволяє отримувати оцінки характеристик динаміки функціонування об'єкту в умовах відносно швидкої зміни попиту на обслуговування. Наведено результати моделювання територіально розподіленого сервісного об'єкту.

Ключові слова: територіально розподілені сервісні системи, імітаційне моделювання, математична модель, системна динаміка, перехідний процес, коливання попиту.

Beskorovainyi V., Soboleva O.

A SYSTEM DYNAMIC MODEL OF THE TERRITORIAL DISTRIBUTED SERVICE SYSTEM

This paper reports the development of a System Dynamics model for the Strategic planning of a municipal service system. The model is capable of handling the critical variables that impact the operations of a delivery scheme. The model was developed using the Vensim programming software to handle the process dynamics. There are presented results of the proposed model simulation of the municipal service system with a 100 % increase of service demand. It is concluded that the model developed is sensitive to variable changes and has the capability of answering various operational what-if questions. As a strategic planning tool, the present model generates, for different scenarios, important operational information for the management of resources of the municipal service system.

Key words: territorial distributed service system, simulation, mathematical model, system dynamic, transient, demand fluctuation.

REFERENCES

1. Petrov E.G., Pisklakova V.P., Beskorovajnyj V.V. Territorialno raspredelenny'e sistemy' obsluzhivaniya. Kiev, Tehnika, 1992, 208 p.
2. By'chenok N.N., Mashkin V.I. Ob e'ffektivnosti avtomatizatsii upravleniya regional'noj bezopasnost'yu, *Kibernetika i obchysliuvalna tekhnika. Novi kompiuterni zasoby, obchysliuvalna tekhnika i merezhi*. Kyiv, 2001, Vol. 2, pp. 38–43.
3. Porter M.E., Olmsted Taysberg E. Pereosmy'slenie sistemy' zdravooohraneniya, Kyiv, Vydavnytstvo Oleksiia Kapusty, 2007, 620 p.
4. Petrov E.G., Baddur A. X. Modeli priblizhonnogo ocenivaniya strukturno-topologicheskix i parametricheskix karakteristik territorial'no-raspredelenny'x system obsluzhivaniya, *Vestnik Xersonskogo Naczional'nogo texnicheskogo universiteta*, 2011, No. 41, pp. 328–334.
5. Komyak V.M., Kose A.G. Model' razmeshheniya pozhar'ny'x depo v usloviyax neodnorodnosti xarakteristik sel'skoj mestnosti, *Problemy' pozhar'noj bezopasnosti: Sbornik nauchny'x trudov*, 2010, No. 28, pp. 106–113.
6. Andronov V.A., Babkov Yu.P. Osoblyvosti rozpodilu administratyvno-terytorialnykh odynyt za kharakterom ta kilkistiu operatyvnykh zavdan pozhezhno-riatuvalnykh pidrozdiliv, *Problemy' pozhar'noj bezopasnosti: Sbornik nauchny'x trudov*, 2010, No. 28, pp. 9–14.
7. Kulieshov M.M. Udoskonalennia systemy vzaiemodii pid chas likvidatsii naslidkiv nadzvychainykh sytuatsii, *Problemy nadzvychainykh sytuatsii: Zbirnyk naukovykh prats*, 2008, No. 8., pp. 103–108.
8. Shevchenko L.P., Pirogov A.V. Upravlenie likvidatsiej chrezvy'chajny'x situatsij putem optimalnogo raspredeleniya i pereraspredeleniya resursov, *Problemy nadzvychainykh sytuatsii: Zbirnyk naukovykh prats*, 2008, No. 8, pp. 220–225.
9. Valkman Yu.R., Mutsakovskaya E.V. Ispol'zovanie imitacionnogo modelirovaniya processov v biznese, *Modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii: Zbirnyk naukovykh prats*, Kyiv: IPME im. H.Ye.Pukhova NAN Ukrainy, 2010, No. 58, pp. 90–97.
10. Forrester Dzh. Osnovy' kibernetiki predpriyatiya (Industrial'naya dinamika), Moscow, Progress, 1971, 340 p.
11. Ly'chikina N.N. Retrospektiva i perspektiva sistemnoj dinamiki. Analiz dinamiki razvitiya, *Biznes-informatika*, 2009, No. 3(09), pp. 55–67.