УДК 519.248

В.П. Долгин, канд. техн. наук
Севастопольский национальный технический университет,
(Украина, 99053, Севастополь, ул. Университетская, 33,
тел. (0692) 543570, e-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua)

Инверсная модель массового обслуживания

Предложен метод решения задачи определения интенсивностей потоков, обеспечивающих заданные свойства системы массового обслуживания. Рассмотрены варианты постановки задачи, приведены результаты имитационного моделирования.

Запропоновано метод розв'язку задачі визначення інтенсивностей потоків, що забезпечують задані властивості системи масового обслуговування. Розглянуто варіанти постановкі задачі, наведено результати імітаційного моделювання.

Ключевые слова: обслуживание, поток событий, вероятность состояний, обратная задача.

Анализ системы массового обслуживания (СМО) обычно сводится к нахождению вероятностей ее состояний, на основании которых определяются характеристики эффективности работы [1]. При аналитическом исследовании СМО заданы ее состояния и интенсивности потоков событий, случайно переводящих систему из состояния в состояние. При изменении интенсивностей потоков событий изменяются вероятности состояний, в которых может находиться система. В этой ситуации коррекция свойств СМО возможна итерационными методами, что вызывает затруднения, так как изменение вероятности одного состояния, например посредством изменения интенсивностей потоков, связанных с этим состоянием, ведет к перераспределению вероятностей остальных состояний.

Постановка задачи. Рассмотрим систему с дискретными состояниями и непрерывным временем заданной структуры, для которой известно множество ее состояний S, граф состояний и значения некоторых интенсивностей потоков. Необходимо определить значения остальных интенсивностей потоков, обеспечивающих требуемые вероятности состояний системы, считая все потоки простейшими. В этом случае задача может быть сформулирована так. Дано следующее:

состояния системы $S = \{S_0, S_1, ..., S_n\}$;

интенсивности потоков отказов (восстановлений);

заданные вероятности состояний.

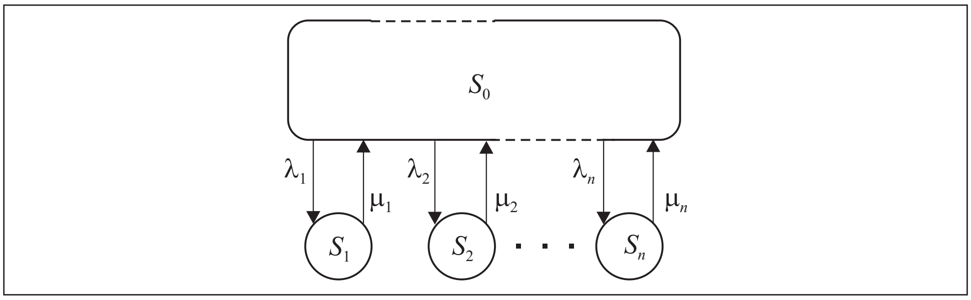

Рис. 1

Требуется найти значения интенсивностей потоков восстановлений (отказов), обеспечивающих заданные вероятности состояний системы.

Метод решения. Будем искать решение для финальных вероятностей. Финальная вероятность состояния системы, определяемая как среднее относительное время пребывания системы в том или ином состоянии, может быть приближена к желаемой посредством изменения интенсивностей потоков.

Пусть система состоит из n блоков, каждый из которых может независимо от других отказать. Отказавший блок сразу же начинает восстанавливаться. Интенсивность потока отказов i-го блока обозначим λ_i, а интенсивность потока его восстановления — μ_i, $i=[\overline{1,n}]$. В соответствии с описанным процессом система может пребывать в одном из следующих состояний: S_0 — исправна (работает), S_1 — неисправна, отказал блок 1 (на ремонте), S_2 — неисправна, отказал блок 2 (на ремонте), ..., S_n — неисправна, отказал блок n (на ремонте).

На рис. 1 изображен размеченный граф состояний, соответствующий данной системе. Для приведенного графа составим систему уравнений Колмогорова по известному правилу [1], устанавливающему баланс между входящими и исходящими потоками каждого состояния. Для любого i-го состояния можно записать

$$\sum_{j=0}^{n} p_j \gamma_{ji} = p_i \sum_{j=0}^{n} \gamma_{ij}, \quad i \neq j, \tag{1}$$

где γ_{ij} и γ_{ji} — интенсивности исходящих и входящих потоков; p_i, p_j — финальные вероятности; n — номер конечного состояния системы. Руководствуясь мнемоническим правилом (1), представим систему уравнений, описывающую возможные состояния системы обслуживания, в виде

$$S_0 : \sum_{j=1}^{n} p_j \mu_j = p_0 \sum_{i=1}^{n} \lambda_i,$$
$$S_1 : p_1 \mu_1 = p_0 \lambda_1,$$
$$S_2 : p_2 \mu_2 = p_0 \lambda_2, \quad (2)$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$S_n : p_n \mu_n = p_0 \lambda_n.$$

Для большинства систем интенсивности потоков отказов практически не могут быть существенно изменены. Например, для технических систем они определяются в основном технологией изготовления узлов системы. Для информационных систем поток заявок на обслуживание, как правило, не является управляемой величиной, но потоки восстановлений зависят от организации процесса обслуживания и могут изменяться в широких пределах. Это делает результат решения реализуемым.

В системе уравнений (2) примем в качестве неизвестных, подлежащих определению, интенсивности потоков восстановлений μ_j, $j = [\overline{1, n}]$. Следует заметить, что в (2) число уравнений превышает число неизвестных. В этом случае требуется применение методов решения переопределенной системы уравнений. Однако для данной задачи можно упростить решение посредством исключения любого уравнения из системы (2), так как уравнение Колмогорова для состояния S_0 является суммой уравнений, описывающих остальные состояния. Для получения решения необходимо задать интенсивности потоков отказов λ_j, $j = [\overline{1, n}]$, требуемые значения вероятностей состояний p_j, $j = [\overline{1, n}]$, и решить линейную систему уравнений относительно μ_j, $j = [\overline{1, n}]$.

Для экспериментальной проверки оценки эффективности метода решим прямую задачу при заданных случайным образом множествах интенсивностей потоков отказов и восстановлений системы:

$$\lambda = \{\, 0{,}268;\ 0{,}247;\ 0{,}316;\ 0{,}412;\ 0{,}266\},$$
$$\mu = \{1{,}50;\ 4{,}56;\ 2{,}86;\ 3{,}28;\ 3{,}39\}. \quad (3)$$

Определим вероятность состояния S_0 по формуле

$$p_0 = 1 \Bigg/ \left(1 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i / \mu_i \right),$$

где n — число неисправных состояний системы, и вероятности остальных состояний $(S_1, S_2, \ldots, S_n)$ по формуле $p_i = p_0 \lambda_i / \mu_i$, а также найдем

$$p = \{0{,}646;\ 0{,}115;\ 0{,}035;\ 0{,}0714;\ 0{,}0815;\ 0{,}0511\}. \quad (4)$$

При решении обратной задачи зададим множество λ, множество вероятностей состояний p и множество μ. Для этого составим систему линейных уравнений Колмогорова (2), алгоритмическая интерпретация которой имеет вид

```
eq[0]:=P[0]*sum('λ[i]','i'=1..n)=sum('P[i]*μ[i]','i'=1..n),
for i to n do eq[i]:=μ[i]*P[i]=λ[i]*P[0] od,
Sys:={seq(eq[i],i=0..n-1)},
Var:={seq(μ[i],i=1..n)},
Sol:=solve(Sys,Var),
```

и решим относительно μ[i], $i=[\overline{1,n}]$, с помощью математического пакета Maple. В результате получим множество интенсивностей μ с погрешностью, лежащей в пределах младшего разряда вычислительной системы.

При построении решения по схеме (2) в качестве переменных, подлежащих выбору, могут быть выбраны интенсивности потоков отказов и восстановлений, а также вероятности состояний в сочетаниях, не нарушающих корректность системы (2). Для примера решим задачу коррекции системы при тех же исходных данных в следующей постановке.

Дано:

состояния системы $S=\{S_0, S_1, ..., S_n\}$;

интенсивности потоков отказов (некоторые значения);

интенсивности потоков восстановлений (некоторые значения);

заданные вероятности некоторых состояний.

Требуется найти значения интенсивностей потоков, обеспечивающих заданные вероятности состояний системы, и определить вероятности ее остальных состояний.

К системе уравнений (2) добавим уравнение нормировки. В качестве неизвестных, подлежащих определению, выберем интенсивности потоков и вероятности состояний, образующие множество неизвестных: $X=\{\lambda_1, p_2, \mu_3, \mu_4, p_5\}$. Матрицу коэффициентов A и матрицу свободных членов B представим в виде

$$A=\begin{bmatrix} p_0 & -\mu_2 & -p_3 & -p_4 & -\mu_5 \\ p_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B=\begin{bmatrix} p_1\mu_1 - p_0(\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4+\lambda_5) \\ p_1\mu_1 \\ p_0\lambda_2 \\ p_0\lambda_3 \\ p_0\lambda_4 \\ p_0\lambda_5 \\ 1-p_0-p_1-p_3-p_4 \end{bmatrix}.$$

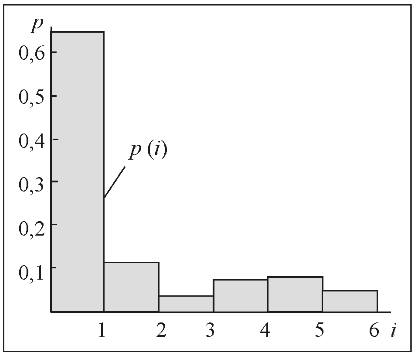

Рис. 2

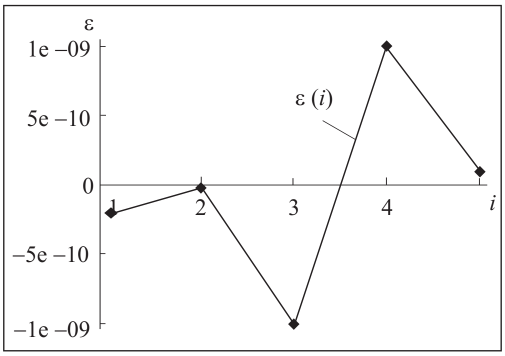

Рис. 3

Решим систему линейных уравнений $AX = B$ с переопределенной матрицей методом квадратных корней [2]. На рис. 2 изображена гистограмма распределения полученных вероятностей состояний рассмотренного примера. В результате решения задачи значения вектора неизвестных X, включая вероятности состояний p_2 и p_5, получены с погрешностью, лежащей в пределах младшего разряда вычислительной системы. Это видно из рис. 3, на котором нанесены точки, имеющие значения погрешностей i-й компоненты вектора погрешности.

По результатам коррекции можно построить графики текущих значений вероятностей при известных значениях интенсивностей потоков (3). Для этого составим систему уравнений Колмогорова и решим их относительно искомых вероятностей. Уравнения Колмогорова для условий примера имеют вид

$$\begin{gathered} p_0'(t)+p_0(t)\sum_{i=1}^{n}\lambda_i=\sum_{i=1}^{n}p_i(t)\mu_i, \\ p_1'(t)+p_1(t)\mu_1=p_0(t)\lambda_1, \\ p_2'(t)+p_2(t)\mu_2=p_0(t)\lambda_2, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ p_n'(t)+p_n(t)\mu_n=p_0(t)\lambda_n. \end{gathered} \tag{5}$$

При этом примем условие нормировки

$$\sum_{i=1}^{n}p_i(t)=1.$$

Для решения полученной системы уравнений (5) введем условие нормировки [1], заменив им одно из уравнений системы (5). Ввод уравнения нормировки в систему (5) определяет ее начальное состояние. Решение системы линейных дифференциальных уравнений (5) получим с помощью операторного метода.

Перейдем к операторной форме, заменив уравнение Колмогорова, описывающее состояние S_0, уравнением нормировки. В этом случае начальным состоянием системы будет состояние S_0, при котором его вероятность в начальный момент времени ($t = 0$) примет значение $p_0(0)=1$. Запишем систему уравнений (5) в окончательном виде:

$$\begin{gathered}\sum_{i=1}^{n} p_i(s)=1/s,\\ sp_1(s)+p_1(s)\mu_1=p_0(s)\lambda_1,\\ sp_2(s)+p_2(s)\mu_2=p_0(s)\lambda_2,\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\ sp_n(s)+p_n(s)\mu_n=p_0(s)\lambda_n.\end{gathered}\tag{6}$$

В результате решения линейной системы уравнений (6) при значениях интенсивностей потоков, совпадающих с заданными (3), получим операторные функции вероятностей состояний:

$$\begin{aligned}p_0(s)&=\frac{s^5+15{,}6s^4+94{,}8s^3+280s^2+399s+218}{s^6+17{,}1s^5+114s^4+366s^3+568s^2+337s},\\ p_1(s)&=0{,}268\frac{s^4+14{,}1s^3+73{,}7s^2+169s+145}{s^6+17{,}1s^5+114s^4+366s^3+568s^2+337s},\\ p_2(s)&=0{,}247\frac{s^4+11{,}0s^3+44{,}5s^2+77{,}1s+47{,}7}{s^6+17{,}1s^5+114s^4+366s^3+568s^2+337s},\\ p_3(s)&=0{,}316\frac{s^4+113s^3+12{,}7s^2+58{,}4s+76{,}1}{s^6+17{,}1s^5+114s^4+366s^3+568s^2+337s},\\ p_4(s)&=0{,}412\frac{s^4+12{,}3s^3+54{,}4s^2+102s+66{,}3}{s^6+17{,}1s^5+114s^4+366s^3+568s^2+337s},\\ p_5(s)&=0{,}266\frac{s^4+12{,}2s^3+53{,}4s^2+98{,}8s+64{,}2}{s^6+17{,}1s^5+114s^4+366s^3+568s^2+337s}.\end{aligned}\tag{7}$$

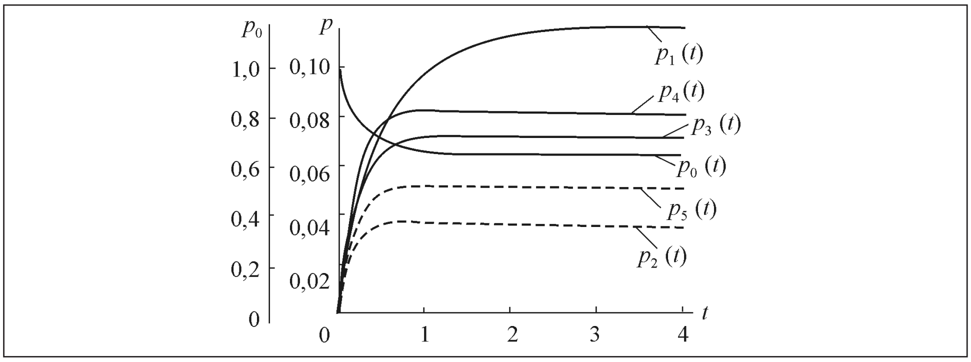

Рис. 4

Применив процедуру обратного преобразования Лапласа, перейдем к оригиналам и получим окончательный результат в виде функций времени вероятностей состояний. Выражения текущих значений вероятностей состояний системы, полученные с помощью математического пакета интегральных преобразований Maple, после упрощения принимают следующий вид:

$$p_0(t) = 0{,}348\sin(1{,}32\,t + 1{,}31)\exp(-5{,}18\,t) +$$

$$+0{,}185\sin(0{,}888\,t + 0{,}0846)\exp(-2{,}57\,t) + 0{,}00203\exp(-1{,}59\,t) + 0{,}647\,,$$

$$p_1(t) = 0{,}0193\sin(1{,}32\,t - 1{,}77)\exp(-5{,}18\,t) +$$

$$+0{,}0162\sin(0{,}888\,t - 1{,}86)\exp(-2{,}57\,t) + 0{,}0808\exp(-1{,}59\,t) + 0{,}115\,,$$

$$p_2(t) = 0{,}0557\sin(1{,}32\,t - 2{,}59)\exp(-5{,}18\,t) +$$

$$+0{,}0208\sin(0{,}888\,t - 2{,}78)\exp(-2{,}57\,t) + 0{,}00133\exp(-1{,}59\,t) + 0{,}035\,,$$

$$p_3(t) = 0{,}0357\sin(1{,}32\,t - 2{,}07)\exp(-5{,}18\,t) +$$

$$+0{,}0158\sin(0{,}888\,t - 2{,}1)\exp(2{,}57\,t) + 0{,}00467\exp(-1{,}59\,t) + 0{,}0714\,,$$

$$p_4(t) = 0{,}0601\sin(1{,}32\,t - 1{,}97)\exp(-5{,}18\,t) +$$

$$+0{,}0432\sin(0{,}888\,t - 1{,}96)\exp(-2{,}57\,t) + 0{,}0143\exp(-1{,}59\,t) + 0{,}811\,,$$

$$p_5(t) = 0{,}0387\sin(1{,}32\,t - 1{,}99)\exp(-5{,}18\,t) +$$

$$+0{,}0287\sin(0{,}888\,t - 2{,}41)\exp(-2{,}57\,t) + 0{,}0036\exp(-1{,}59\,t) + 0{,}507\,.$$

На рис. 4 изображены графики функций текущих вероятностей состояний системы, где график вероятности $p_0(t)$ начального состояния S_0 для наглядности представлен в уменьшенном масштабе. Асимптотами функций являются финальные вероятности (4) состояний системы (штриховые линии), которые в случае необходимости могут быть вычислены по формулам текущих вероятностей состояний (7) как предельные значения при $t \to \infty$: $p_i(\infty) = \lim_{t\to\infty} p_i(t)$, $i = 0 \dots n$.

Таким образом, применив изложенный метод, можно решать задачи комплексной оптимизации процессов, вводя одновременно требования к различным параметрам систем обслуживания. Возможность введения дополнительных неизвестных, например таких, как вероятности состояний системы, позволяет дополнить вектор неизвестных в случае, если число неизвестных меньше числа уравнений, и преобразовать матрицу коэффициентов в квадратную форму для решения обычной системы уравнений. Это упрощает процедуру анализа и синтеза системы.

Общий случай решения инверсной задачи. Рассмотренный алгоритм решения применим для структуры графа состояний, приведенной на рис. 1. При наличии дополнительных связей между состояниями применение изложенного подхода вызывает затруднения, связанные с необходимостью структурных преобразований. Наличие дополнительных связей при большом числе состояний усложняет процесс анализа системы.

Рассмотрим процедуру решения поставленной задачи для системы технического обслуживания (ТО) автотранспортного предприятия (АТП) [3], граф состояний которой представлен на рис. 5, где введены следующие обозначения состояний: S_1 — работа на линии; S_2 — ТО-2; S_3 — текущий ремонт; S_4 — капитальный ремонт; S_5 — простой по организационным причинам; S_6 — простой по организационно-техническим причинам; S_7 — ТО-1 для простейших потоков. Вероятности перечисленных состояний обозначим $p_i = P\{S_i\}$, $i = 1, \dots, m$, где $m = 7$ — число состояний системы.

Выберем математическую модель решения с помощью квадратной матрицы. Интенсивность исходящих из состояния S_1 потоков определена схемой служивания подвижного состава, которая обусловлена необходимостью производства регламентных работ, учитывающих пробег транспортных средств. Поэтому изменения величины исходящих из S_1 потоков нежелательны. Допустимой можно считать коррекцию потоков обслуживания, исходящих из остальных состояний.

Целью коррекции потоков является обеспечение вероятностей состояний системы, доставляющих системе обслуживания требуемый технический, экономический, либо другой эффект, например структурной адаптации предприятия. В качестве интерпретации, в зависимости от выбранной цели, вероятность состояния может быть выражена относительным чис-

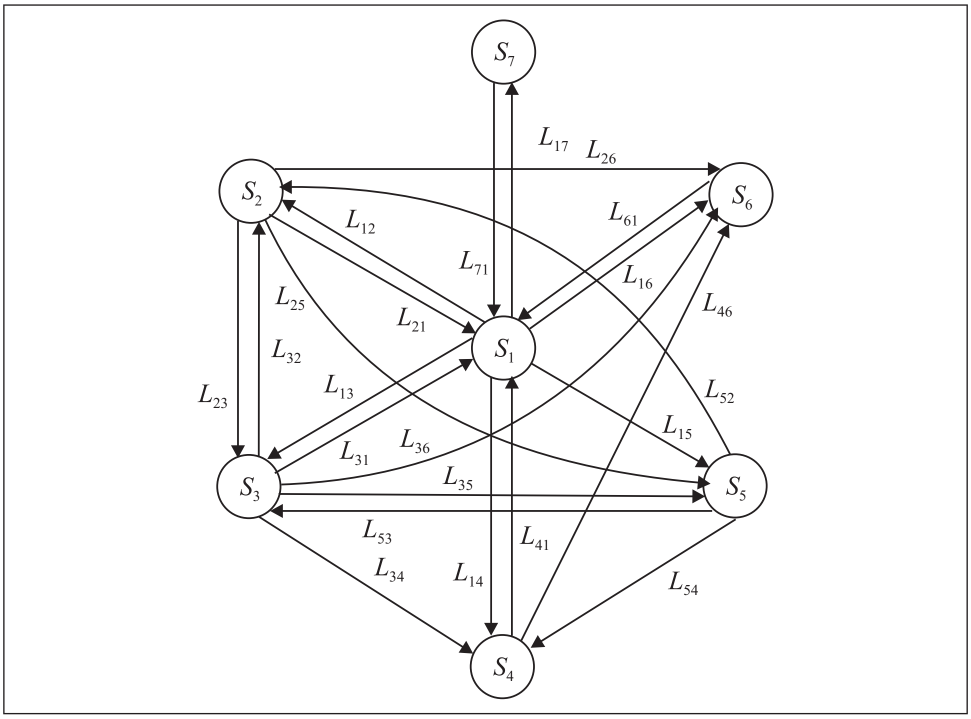

Рис. 5

лом автомобилей, находящихся в определенном состоянии ($p_i = n_i / N$, где n_i — число автомобилей, находящихся в состоянии S_i; N — число автомобилей АТП), либо временем t_i пребывания системы в состоянии S_i ($p_i = t_i / T$, где T — фонд времени предприятия). Зная значения t_i, можно найти требуемое число обслуживающего персонала в соответствии с режимом работы предприятия, либо оценить стоимость времени эксплуатации транспортного средства и другие экономические и технические показатели, характеризующие эффективность работы АТП.

Пример. Решим задачу в общей постановке: по заданным вероятностям состояний системы p_i, $i = 1, ..., m$, и известным значениям интенсивностей локального множества потоков определить значения остального множества потоков размеченного графа состояний (см. рис. 5). Для этого, соблюдая правило (1), составим систему уравнений Колмогорова для финальных вероятностей в порядке возрастания индексов состояний:

$$p_1(L_{12} + L_{13} + L_{14} + L_{15} + L_{16} + L_{17}) = p_2 L_{21} + p_3 L_{31} + p_4 L_{41} + p_6 L_{61} + p_7 L_{71},$$

$$p_2(L_{21} + L_{23} + L_{25} + L_{26}) = p_1 L_{12} + p_3 L_{32} + p_5 L_{52},$$

$$\begin{gathered}
p_3(L_{31}+L_{32}+L_{34}+L_{35}+L_{36})=p_1L_{13}+p_2L_{23}+p_5L_{53},\\
p_4(L_{41}+L_{46})=p_1L_{14}+p_3L_{34}+p_5L_{54},\\
p_5(L_{52}+L_{53}+L_{54})=p_1L_{15}+p_2L_{25}+p_3L_{35},\\
p_6L_{61}=p_1L_{16}+p_2L_{26}+p_3L_{36}+p_4L_{46},\\
p_7L_{71}=p_1L_{17}.
\end{gathered} \tag{8}$$

При заданных значениях вероятностей состояний исключаем уравнение нормировки, необходимое в случае, когда одна или несколько вероятностей состояний подлежат определению.

В соответствии с правилом (1) введем обозначения интенсивностей потоков L_{ij}, где i — индекс состояния, из которого поток исходит, а j — индекс состояния, в которое поток входит. Сформируем локальное множество интенсивностей потоков, подлежащих определению. Введем в его состав множество интенсивностей потоков $X=\{L_{12},...,L_{17},L_{23}\}$, которое состоит из семи элементов ($m=7$), что определяет размерность матрицы A коэффициентов $m\times m$:

$$A=\begin{bmatrix}
p_1 & p_1 & p_1 & p_1 & p_1 & p_1 & 0\\
p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_2\\
0 & 0 & p_1 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & p_1 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & p_1 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_1 & 0
\end{bmatrix}. \tag{9}$$

Сформируем вектор свободных членов B, описав его элементы:

$$\begin{gathered}
B_1=p_2L_{21}+p_3L_{31}+p_4L_{41}+p_6L_{61}+p_7L_{71},\\
B_2=p_2(L_{21}+L_{25}+L_{26})-p_3L_{32}-p_5L_{52},\\
B_3=p_3(L_{31}+L_{32}+L_{34}+L_{35}+L_{36})-p_5L_{53},\\
B_4=p_4(L_{41}+L_{46})-p_3L_{34}-p_5L_{54},\\
B_5=p_5(L_{52}+L_{53}+L_{54})-p_2L_{25}-p_3L_{35},\\
B_6=p_6L_{61}-p_2L_{26}-p_3L_{36},\\
B_7=p_7L_{71}.
\end{gathered} \tag{10}$$

Имея матрицу коэффициентов A и вектор свободных членов B, можно найти значения вектора X искомых интенсивностей, решив уравнение $A \times X = B$. Наложим условие на элементы вектора B (элементы вектора свободных членов (10) должны иметь положительные значения)

$$B_1 > 0,\ B_2 > 0, \ldots, B_m > 0\,. \tag{11}$$

В общем случае условие (11) может выполняться для части элементов вектора B. При этом сведение (9) к условию (11) может быть выполнено посредством увеличения интенсивностей суммируемых потоков, либо уменьшением интенсивностей вычитаемых потоков, либо компромиссным подходом, состоящим в увеличении суммируемых и уменьшении вычитаемых интенсивностей потоков. Указанное решение получают на основании технико-экономического анализа.

При выполнении изложенной стратегии доопределения интенсивности потоков предпочтение необходимо отдавать выбору потоков, не входящих одновременно в несколько описаний элементов вектора B. Такими интенсивностями потоков в рассматриваемом примере являются L_{21}, L_{31}, L_{41}, L_{46}, L_{61}. В противном случае коррекцию потоков необходимо осуществлять рекуррентно либо вводить процедуру оптимизации на основе технико-экономических показателей, что является самостоятельной задачей. Рассмотрим методику реализации изложенной процедуры решения на примере имитационной модели.

Имитационная модель. Представим описание интенсивностей исходящих потоков из перечисленных состояний в виде

$$V_1 := [L_{12}, L_{13}, L_{14}, L_{15}, L_{16}, L_{17}],\ V_2 := [L_{21}, L_{23}, L_{25}, L_{26}],$$
$$V_3 := [L_{31}, L_{32}, L_{34}, L_{35}, L_{36}],\ V_4 := [L_{41}, L_{46}],$$
$$V_5 := [L_{52}, L_{53}, L_{54}], V_6 := [L_{61}],\ V_7 := [L_{71}],$$

где $V_i \Rightarrow S_i$ — вектор исходящих потоков из состояния S_i с помощью генератора случайных чисел

$$V_1 := [.964, .492, .488, .466, .164, .771], V_2 := [.303, .222, .701, .716],$$
$$V_3 := [.573, .286, .771, .565, .853], V_4 := [.642, .0991],$$
$$V_5 := [.0754, .0820, .571], V_6 := [.966], V_7 := [.723].$$

На первом этапе добавим в систему уравнений (8) уравнение нормировки $\sum_{i=1}^{m} p_i = 1$ и найдем исходные вероятности системы обслуживания,

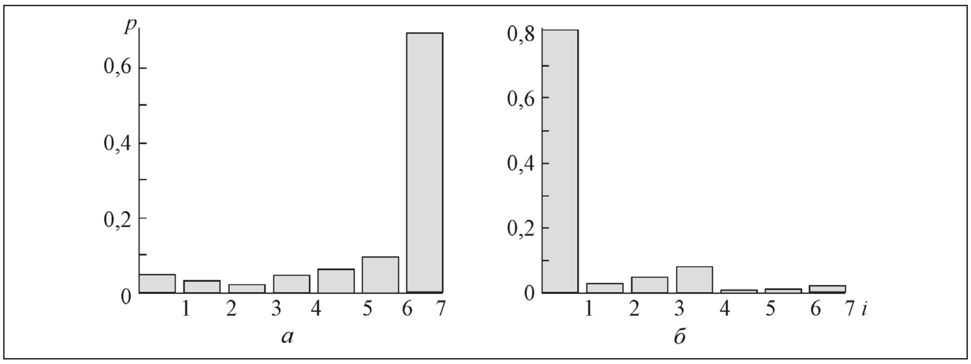

Рис. 6

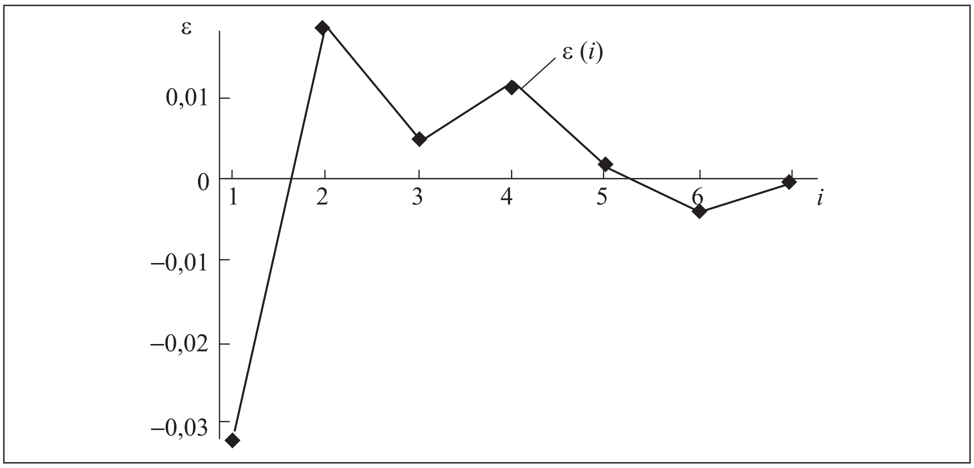

Рис. 7

представленные в виде гистограммы распределения вероятностей состояний на рис. 6, *а*. Введем вектор желаемых вероятностей состояний

$$p := [.8,\ .03,\ .05,\ .08,\ .01,\ .01,\ .02] \tag{12}$$

и, вычислив элементы вектора B, получим $B_5 < 0$, $B_6 < 0$, что свидетельствует о необходимости введения коррекции интенсивностей потоков. Выбрав для реализации коррекции интенсивности потоков L_{61} и L_{54} , получим $B_5 > 0$, $B_6 > 0$, $B_4 < 0$.

На втором этапе для коррекции B_4 выберем интенсивность потока L_{41}, в результате чего будет удовлетворено условие (11). Требуемое значение интенсивности потока вычисляем посредством определения критического значения интенсивности, при котором значение элемента вектора B_i обращается в нуль. Для выполнения условия (11) найденное значение интенсивности должно быть увеличено, например, посредством его умножения на коэффициент $k > 1$.

В результате коррекции найденные интенсивности потоков составили: $L_{41} := 1.142605750$; $L_{54} := 5.247660000$; $L_{61} := 7.054300000$; $X :=$ $= [.0456, .180, .0101, .00612, .00800, .0181, .233]$. Гистограмма распределения вероятностей состояний для данного случая изображена на рис. 6, *б*.

На рис. 7. представлен график погрешности полученных значений вероятностей, где точки соответствуют значениям погрешностей $\varepsilon(i)$ вычисленных вероятностей состояний p_i (i — номер состояния относительно заданных (12)). Погрешность является следствием округления до трех значащих цифр результата вычисления интенсивностей потоков и в случае необходимости может быть уменьшена при увеличении точности представления.

Выводы

Изложенный метод решения задачи настройки СМО позволяет обеспечить заданные параметры посредством коррекции интенсивностей потоков.

Предложенный алгоритм дает возможность осуществить локализацию множества интенсивностей потоков при реализации процедуры коррекции.

The method for solving the problem of determining intensities of the streams providing the preset properties of the queuing system is offered. The problem posing principles have been considered, simulation results have been presented.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: Учеб. пособие для втузов. 2-е изд. — М. : Высш. шк., 2000. — 383 с.
2. *Дьяконов В.П.* Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. — М. : Наука, 1989. — 240 с.
3. *Ротенберг Р.В.* Основы надежности системы «водитель — автомобиль — дорога — среда». — М. : Машиностроение, 1986. — 216 с.

Поступила 13.03.13

ДОЛГИН Владимир Прохорович, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Севастопольского национального технического университета. В 1958 г. окончил Военно-морское инженерное училище им. Ф.Э. Дзержинского (Ленинград), в 1965 г. — Севастопольский приборостроительный ин-т. Область научных исследований — адаптивные модели в системах управления технологическими объектами.