

УДК 004.825:519.713.6

МОДЕЛЬ СТОХАСТИЧЕСКОГО АВТОМАТА ДЛЯ СИНТЕЗА ПРОДУКЦИЙ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

Горбачев Д.В., Кузнецов О.В.

Оренбургский государственный университет, Оренбург, e-mail: gordi47@mail.ru

Управление медицинской организацией – сложная и многоаспектная задача, самым непосредственным образом связанная с обеспечением качества оказания медицинской помощи. Исследованию процессов управления современной больницы посвящено большое количество трудов российских ученых, которые, как правило, основаны на применении подходов структурного моделирования и последующей оценки экономических параметров деятельности медицинской организации. Структурные модели достаточно хорошо описывают межпроцессные взаимосвязи, однако не рассматривают их характеристики: время возникновения, время действия, сила связи, состояния объектов межпроцессных коммуникаций. Между тем знание этих характеристик может быть весьма полезным, а иногда даже необходимым для прогнозирования и планирования деятельности организации. Инициатором процесса оказания медицинской помощи является пациент. Проходя стадии лечения, пациент «нагружает» участников этого процесса и изменяет свое состояние. При этом традиционно врач при составлении прогноза лечения заболевания опирается на свой опыт и исходит из существующей статистики. В достаточно большом числе случаев такой прогноз подтверждается дальнейшим ходом лечения заболевания. В исследовательском аспекте значительный интерес представляет анализ всего пространства состояний, в которых может находиться пациент. Это знание позволит учесть возможное развитие заболевания, рассчитать вероятностные характеристики состояний процесса, подготовиться к выбору медицинской технологии лечения. Кроме того, имитационная форма данной модели может быть использована для генерации потока пациентов с заданными параметрами: диагноз, стадия, степень тяжести заболевания, что, в свою очередь, можно использовать для оценки возможностей медицинской организации. Таким образом, моделирование пространства состояний пациента может считаться актуальной научно-практической задачей. В качестве базового подхода для решения данной задачи используется комбинация методов моделирования на основе Р-схемы (вероятностный автомат) и правила и логический вывод на основе системы продукций.

Ключевые слова: целевой исход, степени тяжести заболевания, граф состояний, конечный вероятностный автомат, язык автомата, стохастическая грамматика, вероятность вывода цепочки

MODEL OF THE STOCHASTIC AUTOMATIC MACHINE FOR SYNTHESIS OF RULE SYSTEM SPACE OF CONDITIONS

Gorbachev D.V., Kuznetsov O.V.

Orenburg State University, Orenburg, e-mail: gordi47@mail.ru

The management of a medical organization is a complex and many aspects task most directly related to ensuring the quality of medical care. The study of the management processes of the modern hospital is devoted to a large number of works of Russian scientists, which, as a rule, are based on the application of approaches of structural modeling and subsequent assessment of economic parameters of the activity of the medical organization. Structural models describe inter-process relationships quite well, but do not consider their characteristics: time of occurrence, time of action, strength of communication, state of inter-process communication objects. Meanwhile, knowledge of these characteristics can be very useful, and sometimes even necessary, for forecasting and planning the activities of the organization. The patient is the initiator of the medical care process. During the treatment stages, the patient «loads» the participants of this process and changes his condition. At the same time, traditionally, the doctor in the preparation of the forecast of treatment of the disease relies on his experience and proceeds from the existing statistics. In research aspect the analysis of all state space in which there can be a patient is of the considerable interest. This knowledge will allow to consider possible development of a disease, to calculate probabilistic characteristics of conditions of process, to be prepared for the choice of medical technology of treatment. Besides, the imitating form of this model can be used for oscillation of a flow of patients with the given parameters: the diagnosis, a stage, severity of a disease that, in turn, can be used for assessment of opportunities of the medical organization. Thus, model operation of the state space of the patient can be considered as a relevant scientific and practical task. As basic approach for the solution of this task the composition of methods of model operation on the basis of the P-scheme (the probabilistic automatic machine) and a logical conclusion on the basis of the system of production is used.

Keywords: target outcome, severity of a disease, state graph, finite probabilistic automat, automats language, stochastic grammar, probability of a conclusion of a line-up

Одним из эффективных и доступных инструментов исследования задач управления здравоохранением и медицинской организацией является моделирование. Используя модель, появляются возможности учесть влияние всех сколько-нибудь значимых факторов и их связей на результаты деятельности и своевременно

принимать обоснованные управленческие решения. В настоящее время происходит всесторонняя интеграция медицины и информационных технологий, в связи с чем стало возможным использовать моделирование для всестороннего исследования процессов диагностики и лечения заболеваний [1].

Широкое применение в медицине и здравоохранении нашли кибернетические методы моделирования. Кибернетическая модель представляет собой систему, ориентированную на цель исследования. При этом ключевой особенностью моделей этого класса является возможность взаимодействия эндогенных и экзогенных переменных таким образом, как они связаны в исследуемом процессе. Полученные в результате модели процессов очевидным образом могут быть положены в основу программной имитационной системы.

В ходе ранее проведенных исследований была получена модель, иллюстрирующая процесс лечения пациента [2]. Однако само пространство состояний пациента в ходе лечения заболевания оставалось слабо формализованным.

Целью данного этапа исследования является разработка формализованного алгоритма методического обеспечения имитационной модели для исследования лечебно-диагностического процесса (ЛДП) медицинской организации.

Целевой установкой ЛДП может считаться достижение в ходе лечения некоторого целевого состояния [3]. В общем случае такими целевыми исходами могут считаться исходы, при которых пациент выздоравливает. А, по мнениям экспертов, в некоторых случаях удовлетворительными могут считаться состояния, связанные с ремиссией, хронизацией или стабилизацией.

Граф состояний пациента

В общем случае, пациент может поступить в медицинскую организацию в любом из $x_i \in X, i = 1 \dots 6$ состояний степени тяжести заболевания. При этом, значение $i = 1$ означает «Болезнь отсутствует», а $i = 6$ – летальный исход. Промежуточные значения x_i – тяжесть заболевания [1, 2].

Документами [3, 4] устанавливается процесс оказания медицинской помощи как некоторая совокупность этапов – маршрут, по мере прохождения которого пациент изменяет свое состояние. Таким образом, формируется технология лечения заболевания.

Развитие заболевания может происходить по-разному: сначала у пациента легкая степень тяжести, которая держится в течение некоторого времени; затем – средняя; далее – тяжелая, и т.д. Нередкими являются случаи быстрого развития заболевания – «скачкообразно», когда состояние здоровья ухудшается практически мгновенно (например, инфаркты, инсульты). Лечение заболевания – это всегда последовательный процесс, в ходе которого пациент как бы возвращается в состояние выздоровления.

Указанные факты прогресса заболевания и его лечения положены в основу разрабатываемой модели. При этом целью лечения заболевания считается достижение целевого исхода, заключающегося в восстановлении здоровья пациента.

Состояние пациента $s_i \in S, i = 1, \dots, n$ – это состояние, в котором он может находиться с вероятностью $p_i(s_i)$. При развитии заболевания происходит смена состояния: $\{p_{ij}(s_i \rightarrow s_j): s_i, s_j \in S, i, j = 1, \dots, n; i < j\}$. При выздоровлении модель изменения состояния пациента имеет вид: $\{p_{ji}(s_j \rightarrow s_i): s_i, s_j \in S, i, j = 1, \dots, n; j < i\}$.

В самом общем случае, $n = 6$ (болезнь отсутствует, легкое заболевание, заболевание средней тяжести, тяжелое заболевание, крайне тяжелое заболевание, летальный исход), тогда матрица переходов P имеет вид

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{26} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{16} & \dots & \dots & p_{66} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

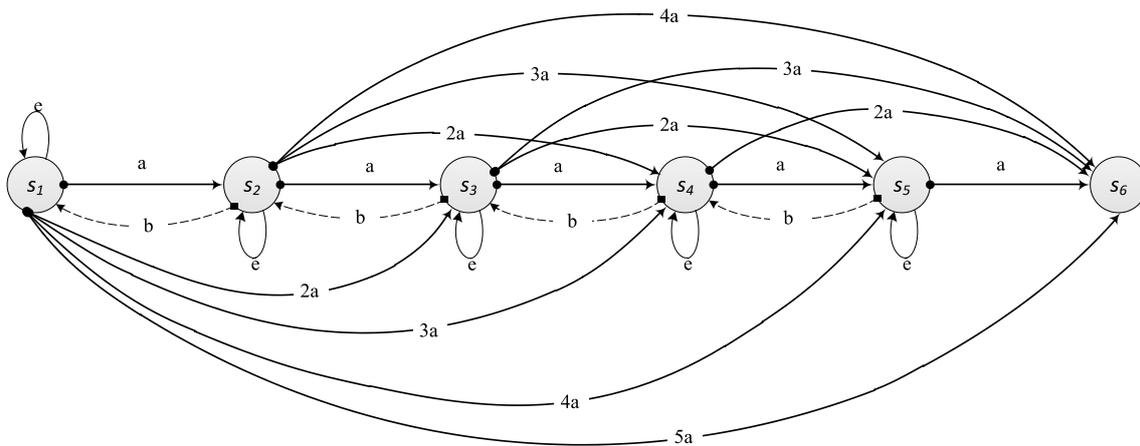
Главная диагональ матрицы P – некоторое состояние пациента. Вероятности справа – это вероятности, соответствующие ухудшению состояния здоровья, а слева – улучшения здоровья в ходе лечения. При этом, исходя из ранее обдуманного предположения о последовательном процессе выздоровления, вероятности $p_{31}, \dots, p_{51}, p_{42}, \dots, p_{52}, p_{53}$, могут быть исключены из рассмотрения. А вероятности летального исхода p_{61}, \dots, p_{66} – не имеет смысл рассматривать.

Поэтому матрицу P можно записать следующим образом:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ & & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ & & & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ & & & & & p_{66} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Таким образом, пространство состояний пациента иллюстрируется маркированным мультиграфом (рис. 1), в котором вершины – это состояния пациента, а дуги могут быть следующих типов:

- α – если есть переход из s_i в s_j (развитие заболевания; показаны сплошными линиями);
- β – если имеет место переход из s_j в s_i (лечение; пунктирная линия);
- ε – случай стабилизации состояния пациента, s_{ii} .



Мультиграф пространства состояний пациента

Рассмотрим пары состояний; s_1 и s_2 , для которых $p_\alpha + p_\beta = 1$. Но при этом не исключаются переходы вида $s_1 \rightarrow s_3$. В этом случае имеет место $2p_\alpha + 2p_\beta = 1$. Анализ возможных конфигураций маршрутов состояний пациента позволяет записать

$$(n - 1)p_\alpha + (n - 2)p_\beta = 1.$$

Для случая s_i , $p_i(s_i) = p_\epsilon$.

Анализ рассматриваемой предметной области показывает, что развитие заболевания может развиваться как непрерывно, так и дискретно (резкое ухудшение здоровья). Причем заранее предсказать, в каком направлении и с какой интенсивностью будут происходить смены состояний пациента возможно только с некоторой долей вероятности. Что касается лечения заболевания, то это преимущественно непрерывный процесс, однако даже при заметном улучшении состояния здоровья возможны осложнения или иные непредвиденные ситуации. Приведенные рассуждения позволяют сделать вывод о дискретно-непрерывном и стохастическом характере рассматриваемого процесса. В данной модели намеренно не учитываются временные характеристики нахождения пациента в том или ином состоянии, поскольку для каждого заболевания имеется явная специфика лечения, а следовательно, и параметр времени будет специфичным. Это несколько упрощает модель, но при этом не теряются значимые для достижения цели исследования особенности.

Моделирование пространства состояний пациента

Как показано в [5], одной из лучших схем моделирования дискретно-стохастических систем является Р-схема, или вероятностный автомат.

Конечный стохастический автомат A_s представляет собой пятерку

$$A_s = \{X, Y, P, \rho_0, F\}, \tag{3}$$

где $x = \{\alpha, \beta, \epsilon\}$; $y = \{y_1, \dots, y_6\}$; $\rho_0 = \|1, 0, 0, 0, 0, 0\|$; $F = \{y_1\}$; $\rho_F = \|1, 0, 0, 0, 0, 0\|$; $P = \{P(\alpha), P(\beta), P(\epsilon)\}$:

$$P(\alpha) = \begin{matrix} & P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} \\ 0 & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{45} & P_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{55} & P_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$P(\beta) = p_{54} \quad p_{43} \quad p_{32} \quad p_{21}^T,$$

$$P(\epsilon) = p_{11} \quad p_{22} \quad p_{33} \quad p_{44} \quad p_{55}.$$

Представленные матрицы интерпретируются следующим образом:

$P(\alpha)$ – модель ухудшения состояния пациента;

$P(\beta)$ – матрица выздоровления;

$P(\epsilon)$ – матрица отсутствия изменений.

Автомат, представленный (3), моделирует язык вида

$$R_1(A_s) = \{(\alpha^m \beta^n \epsilon), p(\alpha^m \beta^n \epsilon)\},$$

где $m = k, n = k - 1$,

$$p(\alpha^m \beta^n \epsilon) = 1 - [(k-1)p_\alpha] = 1 - [(k-2)p_\beta],$$

$$\begin{cases} 1 - [(k-1)p_\alpha], & \text{при } k_i > k_{i-1} - \text{ухудшение состояния;} \\ 1 - [(k-2)p_\beta], & \text{при } k_i < k_{i-1} - \text{улучшение состояния;} \\ p_\epsilon = 1, & \text{при } k_i = k_{i-1} - \text{стабилизация состояния.} \end{cases}$$

Язык $R_1(A_s)$ стохастического автомата получается путем порождения цепочек символов из алфавита этого языка. Синтез цепочек $R_1(A_s)$ основывается на формальной грамматике с дополнительной рандомизацией выбора продукций [6]. Тогда, следующая пятерка является стохастической грамматикой:

$$G_S = (X_T, X_N, P_S, S_0, p_0),$$

где X_T – терминальный словарь (словарь, включающий символы разметки автомата A_s); X_N – нетерминальный словарь (содержит вспомогательные символы, используемые для вывода цепочек языка);

$p_0 = \{p_{01}, \dots, p_{0n}\}$ – вероятностное распределение начальных символов из

$S_0 = \{s_1, \dots, s_n\} \subseteq X_N$, при этом $0 \leq p_{0i} \leq 1$, $\sum_{i=1}^n p_{0i} = 1$;

P_S – конечное множество вероятностных продукций, каждая из которых имеет вид

$$c_i \xrightarrow{p_{ij}} z_{ij},$$

$i = 1, \dots, k$ – число различных выводов цепочек с из символов $s_j, j = 1, \dots, n$ – число начальных символов, p_{ij} – вероятность данной продукции, т.е. число, удовлетворяющее следующим условиям:

$$0 \leq p_{ij} \leq 1, \quad \sum_{i=1}^n p_{0i} = 1.$$

Если продукция $c_i \xrightarrow{p_{ij}} z_{ij}$ принадлежит множеству P_S , то считается, что цепочка $\gamma_1 c_i \gamma_2$ непосредственно порождает цепочку $\gamma_1 z_{ij} \gamma_2$:

$$\gamma_1 c_i \gamma_2 \xrightarrow{p_{ij}} \gamma_1 z_{ij} \gamma_2.$$

Цепочка γ_0 порождает цепочку γ_n , если существует такая последовательность $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_n$, что

$$\gamma_{i-1} \xrightarrow{p_{ij}} \gamma_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Вероятностью такого порождения может считаться число

$$P = \prod_{i=1}^n p_i.$$

Если γ_0 порождает γ_n с вероятностью p , то это записывается следующим образом:

$$\gamma_0 \xrightarrow{p} \gamma_n.$$

Грамматикой G_S порождается стохастический язык $R(G_S)$, представляющий собой множество пар:

$$R(G_S) = \left\{ (c, p(c)) \mid c \in X_T^*; s_i \xrightarrow{p_i} c, p(c) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k p_{0i} p_{ij} \right\},$$

$$i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n,$$

где p_{0i} – вероятность появления i -го начального символа;

p_{ij} – вероятность j -го вывода цепочки с из символа s_i .

Приведенные формальные определения стохастической грамматики G_S позволяют определить стохастический автомат A_S матрицей переходов (2). При этом Стохастическая грамматика этого автомата записывается в виде

$$G_S = (X_T, X_N, P_S, S_0, p_0),$$

где $X_T = \{\alpha, \beta, \varepsilon\}$; $X_N = \{S\}$; $p_0 = 1$; $S_0 = \{S\}$, а стохастические продукции имеют вид

$$S \xrightarrow{p_\alpha} \alpha S; S \xrightarrow{p_\beta} \beta S; S \xrightarrow{p_\varepsilon} \varepsilon S.$$

Данная грамматика порождает язык:

$$R(G_S) = (\{\alpha^n \beta^m \varepsilon\}, \{p_\alpha^n \cdot p_\beta^m \cdot p_\varepsilon\}).$$

Пример [7].

Допустим, в медицинскую организацию поступает пациент в состоянии средней степени тяжести – s_3 . При использовании описанного подхода возможны следующие продукции:

$$\begin{aligned} S_3 &\xrightarrow{p_\alpha} \alpha S_4; S_3 \xrightarrow{p_\beta} \beta S_2; \\ S_3 &\xrightarrow{2p_\alpha} (\alpha + \alpha) S_5; S_3 \xrightarrow{2p_\beta} (\beta + \beta) S_1; \\ S_3 &\xrightarrow{3p_\alpha} \alpha + \alpha + \alpha S_6; S_3 \xrightarrow{p_\varepsilon} \varepsilon S_3. \end{aligned}$$

При равновероятном распределении p_α, p_β имеет вид: $p_\alpha = 0,5$; $p_\beta = 0,5$. Отсюда получим следующие результаты:

- цепочка $c_1 = \alpha\alpha\alpha$ порождается с вероятностью: $p(c_1) = 0,5^3 = 0,125$;
- цепочка $c_2 = \beta\beta$ порождается с вероятностью: $p(c_2) = 0,25$;
- цепочка $c_3 = \alpha\beta\beta\beta$ порождается с вероятностью: $p(c_3) = 0,0625$;
- цепочка $c_4 = \alpha\alpha\beta\beta\beta\beta$ порождается с вероятностью: $p(c_4) = 0,03125$.

Выбранные в данном примере значения p_α и p_β не являются результатом исследования. Значения выбраны произвольно только для демонстрации возможности использования предлагаемого подхода.

Заключение

При поступлении пациента в медицинскую организацию достаточно трудно предсказать, каким будет процесс его лечения и каким исходом он закончится. Проведенные в данной работе исследования показали, что вполне возможно формализовать связи между степенью тяжести заболевания и вероятностями исходов лечения. Причем по характеру эти связи являются функциональными. А значит, могут быть приняты для оценки эффектов деятельности медицинской организации, например по показателю: «Доля достижения целевых исходов».

Кроме того, предлагаемый подход открывает возможности для разработки программной имитационной модели, с помощью которой могут быть набраны статистики для дальнейшего предсказательного моделирования процессов лечения. Очевидным развитием данного подхода является необходимость учета временного параметра в переходах состояний пациента.

Список литературы

1. Борщук Е.Л., Горбачев Д.В., Боев В.М., Зайцева Н.В., Бегун Д.Н., Баянова Н.А. Моделирование процессов в медицине и здравоохранении: моногр. Оренбург: ИПК «Газпресс» ООО «СервисЭнергоГаз», 2015. 152 с.
2. Борщук Е.Л., Горбачев Д.В., Бегун Д.Н., Трофимова О.В. Математическая модель перехода состояний пациента в процессе лечения на основе нейросетевого подхода // Врач и информационные технологии. 2015. № 2. С. 52–59.
3. ГОСТ Р 52600-2006. Протоколы ведения больных. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2007. 19 с.
4. Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 15 ноября 2012 г. № 918н «Об утверждении Порядка оказания медицинской помощи больным с сердечно-сосудистыми заболеваниями» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosminzdrav.ru/documents/9130-prikaz-ministerstva-zdravooh-raneniya-rossiyskoy-federatsii-ot-15-noyabrya-2012> (дата обращения: 18.10.2019).
5. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учебник для академического бакалавриата. 7-е изд. М.: Издательство Юрайт, 2015. 343 с.
6. Кузин Л.Т. Основы кибернетики: т. 2. Основы кибернетических моделей: учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1979. 584 с.
7. Горбачев Д.В., Кузнецов О.Ю., Ямников О.А. Дискретно-стохастическая модель для анализа пространства состояний пациента // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 5. С. 89–92.