

**H.G. DARBINYAN, N.H. NERSISYAN, A.H. DAVTYAN**

**TESTING, DETERMINING OF PARAMETERS AND TORQUE FORCES  
OF BRUSHLESS MOTORS**

Accurate selection of propellers and motors constituting an irreplaceable part of unmanned aerial vehicles (UAV) and having appropriate power and size is performed. A test bench destined for conducting investigation of brushless DC motors is described. The results and test data were obtained and processed in the LabVIEW package environment

*Keywords:* test bench, UAV, Brushless DC Motor, torque, propeller.

УДК 681.51

**С.Ш. БАЛАСАНЯН, В.С. БАЛАСАНЯН, Э.М. ГЕВОРГЯН**

**КОМПЬЮТЕРНАЯ СТРАТИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ  
ОЦЕНКИ И АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ  
СИСТЕМ  
(Капан)**

Предлагается обобщенная стратифицированная модель для оценки и анализа надежности структурно-сложных технических систем. Разработана компьютерная модель сопряжения элементов в предлагаемой модели, позволяющая свести имитацию сопряжения элементов смежных страт к стандартной операции умножения матриц. Показано, что предложенная модель допускает распараллеливание процесса имитации передачи сигналов от элементов каждой страты к элементам последующей страты, что предоставляет возможность при использовании многопроцессорных компьютеров значительно ускорить процесс имитации. Применение предложенной модели в качестве схемы формализации позволяет существенно упростить и ускорить построение компьютерной модели надежности структурно-сложных систем, обеспечивая удобство проведения имитационных экспериментов.

*Ключевые слова:* состояние, стратифицированная модель, страта, надежность, сопряжение, имитация.

**Введение.** Методологической основой существующих методов оценки и исследования надежности сложных технических систем служит концепция системного подхода [1]. Эта концепция в данном случае проявляется в том, что показатели надежности рассматриваются как функционалы от процесса изменения работоспособности элементов системы. В рамках указанного подхода оценка показателей надежности сложных систем основывается на использовании модели процесса изменения работоспособности элементов системы. Ее сущность заключается в следующем. Формально каждый

элемент  $E_i^0 (i = \overline{1, n})$  системы в любой момент времени может находиться в одном из двух возможных состояний  $y_i^0(t) \in Y_i^0 = \{0, 1\}$ : работоспособности и отказа. Совокупность состояний элементов  $y^0(t) = (y_1^0(t), y_2^0(t), \dots, y_{p_0}^0(t))$  в произвольный момент времени однозначно определяет состояние системы с точки зрения ее надежности.

С течением времени под влиянием внешних и внутренних случайных факторов элементы системы переходят из одного состояния в другое. В результате происходит последовательная смена состояний системы в целом. Случайный  $n$ -мерный процесс  $Y^0(t) = \{y^0(t)\}$  рассматривается как формализованный процесс изменения работоспособности элементов системы и описывает ее поведение во времени с точки зрения надежности.

Для оценки и исследования надежности восстанавливаемых структурно-сложных систем (ССС) с большим числом элементов целесообразно использовать метод компьютерного моделирования. Используемая при этом компьютерная модель представляет собой композицию двух моделей. Одна из них воспроизводит формализованный процесс изменения работоспособности элементов СССР  $Y^0(t)$ , вторая имитирует процесс изменения работоспособности системы вследствие этого процесса и представляет собой логическую функцию работоспособности системы  $y^k(t) = H(y_1^0(t), y_2^0(t), \dots, y_{p_0}^0(t))$ .

**Постановка задачи.** Одной из основных проблем, препятствующих построению компьютерной модели процесса изменения работоспособности СССР  $y^k(t) = H(y_1^0(t), y_2^0(t), \dots, y_{p_0}^0(t))$ , является преодоление большой размерности (числа возможных состояний) системы. Так, при построении модели системы, состоящей из 20 бинарных элементов, число рассматриваемых состояний превышает  $10^6$ .

Применение известных методов и способов упрощения моделей в данном случае либо недопустимо снижает точность моделирования, либо резко ограничивает ее возможности.

Одним из возможных путей решения описанной проблемы является применение концепции иерархического многоуровневого (стратифицированного) описания систем [2]. Ее сущность заключается в том, что логическая функция работоспособности системы  $y^k(t) = H(y_1^0(t), y_2^0(t), \dots, y_{p_0}^0(t))$  описывается не одной моделью большой размерности, а иерархией сравнительно простых моделей  $S^\mu$ ,  $\mu \in I = \{1, 2, \dots, k\}$ , каждая из которых описывает

условие работоспособности исследуемой системы на определенном уровне детализации.

В настоящей работе предлагается обобщенная стратифицированная модель, ориентированная на оценку и анализ надежности ССС, позволяющая для определенного класса ССС успешно преодолеть сложность их формализации.

Придерживаясь терминологии, примененной в [2], предлагаемая модель названа бинарной стратифицированной системой (БСС), а уровни детализации, включающие стратифицированное описание, – стратами. Каждая страта  $S^\mu$  БСС представляет собой упорядоченную совокупность не связанных между собой конечного числа элементов  $S_i^\mu, i \in I^\mu = \{1, 2, \dots, p_\mu\}$ , являющихся временными статическими системами без памяти [3].

Структуру связей между элементами БСС можно представить в виде ориентированного графа (рис. 1).

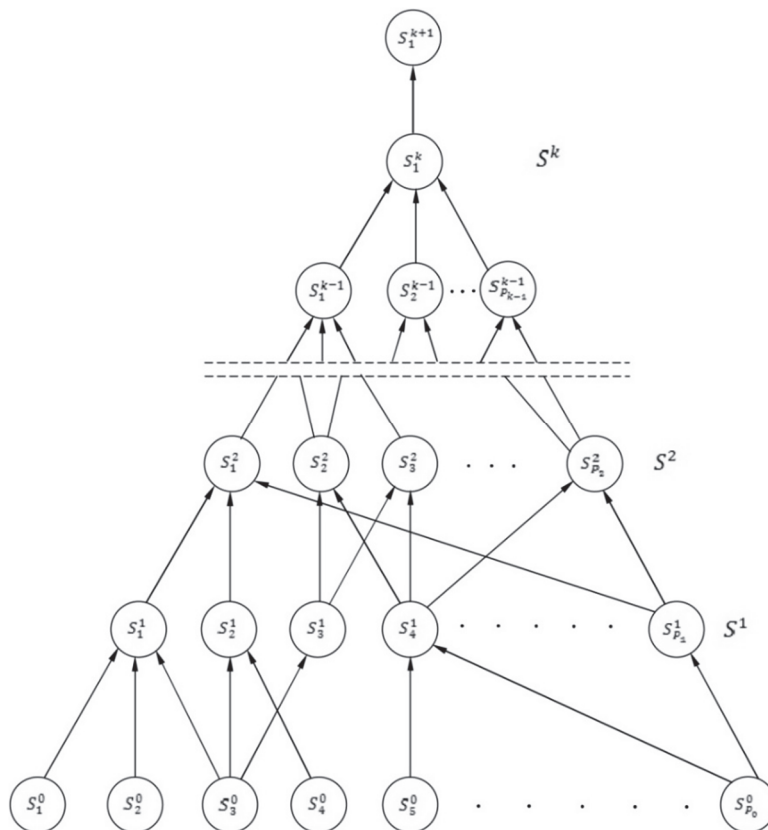


Рис. 1. Структура БСС

На каждом  $\mu$ -ом уровне описания (страте) моделируемая система разбивается на подсистемы  $E_i^\mu, i \in I^\mu$   $\mu$ -го уровня. Каждый элемент  $S_i^\mu$  описывает условие работоспособности подсистемы  $E_i^\mu$  в зависимости от работоспособности входящих в ее состав и влияющих на ее работоспособность подсистем  $(\mu-1)$ -го уровня. В целом каждая страта  $S^\mu$  описывает условие работоспособности моделируемой системы, состоящей из подсистем  $\mu$ -го уровня, в зависимости от работоспособности подсистем  $(\mu-1)$ -го уровня. Навысшая страта  $S^k$  описывает условие работоспособности системы, рассмотренной как одно целое, в зависимости от работоспособности подсистем предпоследнего уровня. Таким образом, на каждой  $\mu$ -й страте описывается условие работоспособности подсистем  $\mu$ -го уровня с точки зрения их внутреннего механизма, откладывая описание их взаимодействия для  $(\mu+1)$ -й страты.

Чем ниже спускаемся по иерархии, тем более детальным становится описание условий работоспособности системы. Компоненты системы, являющиеся ее подсистемами на данной страте, более подробно раскрываются на нижних стратах. Обращаясь к нижним стратам, можно детально объяснить изменение работоспособности отдельных подсистем при изменении работоспособности элементов системы. С другой стороны, чем выше поднимаемся, тем яснее становится последствие влияния изменения работоспособности элементов системы на ее работоспособность. На каждой страте выявляются новые свойства системы и связи между ее подсистемами, которые не существуют на других стратах.

Математическое описание БСС включает формальные описания ее элементов и взаимодействия между ними. Как математический объект каждый элемент  $S_i^\mu$  характеризуется множествами моментов времени  $T_i^\mu$  ( $T_i^\mu$  – подмножество множества действительных чисел), входных сигналов  $X_i^\mu$ , выходных сигналов  $Y_i^\mu$  ( $X_i^\mu$  и  $Y_i^\mu$  – бинарные множества) и оператором  $H_i^\mu$ , представляющим собой логическую функцию работоспособности элемента  $S_i^\mu$ . Входные и выходные сигналы являются функциями времени, их значения в момент времени  $t \in T_i^\mu$  обозначаются  $x_i^\mu(t)$  и  $y_i^\mu(t)$  соответственно. Функционирование каждого элемента  $S_i^\mu$  при заданных множествах  $T_i^\mu$ ,  $X_i^\mu$  и  $Y_i^\mu$  детерминировано и описывается однозначным оператором  $y_i^\mu(t) = H_i^\mu(x_i^\mu(t))$ , реализующим отображение  $X_i^\mu \rightarrow Y_i^\mu$ . Построение операторов  $H_i^\mu, i \in I^\mu = \{1, 2, \dots, p_\mu\}$

осуществляется структурными и логико-вероятностными методами расчета надежности.

Взаимодействие между элементами и стратами БСС, а также между системой и внешней средой рассматривается в рамках механизма обмена сигналами [4]. Для построения математической модели сопряжения элементов и страт в БСС, помимо сформулированных в [4] предположений, введены еще следующие:

- входной сигнал  $x^\mu(t) \in X^\mu$ , поступающий к страте  $S^\mu$  в момент времени  $t \in T$ , можно рассматривать как упорядоченную совокупность сигналов  $x_i^\mu(t) \in X_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$ , одновременно поступающих на входы элементов  $S_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$  этой страты:  $x^\mu(t) = (x_1^\mu(t), x_2^\mu(t), \dots, x_{p_\mu}^\mu(t))$ . Аналогично  $y^\mu(t) = (y_1^\mu(t), y_2^\mu(t), \dots, y_{p_\mu}^\mu(t))$ . Сигналы  $x_i^\mu(t)$  и  $y_i^\mu(t)$  являются логическими переменными;

- элементы любой страты  $S^\mu$  БСС могут принимать только сигналы, выдаваемые элементами страты  $S^{\mu-1}$ .

В силу принятых в [4] предположений, каждому входному контакту  $k_{in}^\mu \in K^\mu = \bigcup_{i \in I^\mu} K_i^\mu$  страты  $S^\mu$  ( $K_i^\mu$  – множество входных контактов элемента

$S_i^\mu$  страты  $S^\mu$ ) можно поставить в соответствие единственный выходной контакт  $c_{jl}^\mu \in C^{\mu-1} = \bigcup_{i \in I^{\mu-1}} C_j^{\mu-1}$  страты  $S^{\mu-1}$ , соединенный с ним элементарным

каналом связи. Следовательно, можно ввести однозначный оператор  $c_{jl}^\mu = R^\mu(k_{in}^\mu)$ ,  $i \in I^\mu$ ,  $j \in I^{\mu-1}$ ,  $n \in N_i^\mu$ ,  $l \in I_j^{\mu-1}$ , реализующий отображение  $K^\mu \rightarrow C^{\mu-1}$ . Область значений оператора  $R^\mu$  совпадает со множеством вы-

ходных контактов страты  $S^{\mu-1}$ .  $R^\mu$  будем называть оператором сопряжения страт  $S^\mu$  и  $S^{\mu-1}$  в БСС. Множества  $K^\mu$  и  $C^{\mu-1}$  вместе с оператором  $R^\mu$  составляют математическую модель сопряжения страт  $S^\mu$  и  $S^{\mu-1}$  в БСС.

Оператор  $R^\mu$  задается бинарной матрицей  $A^\mu$  размером  $\left( \sum_{j=1}^{p_{\mu-1}} l_j^{\mu-1} \right) \times \left( \sum_{i=1}^{p_\mu} n_i^\mu \right)$ ,

столбцы которой соответствуют входным контактам страты  $S^\mu$ , а строки – выходным контактам страты  $S^{\mu-1}$ .

Таким образом, БСС задается упорядоченной совокупностью конечного числа элементов  $S_i^\mu, \mu \in I, i \in I^\mu$ , множеств  $K^\mu, C^{\mu-1}, \mu \in I$  и семейством операторов  $R^\mu, \mu \in I$ .

Формально сопряжение любых смежных страт  $S^{\mu-1}$  и  $S^\mu$ , т.е. формирование входного сигнала  $x^{\mu-1}(t)$  страты  $S^\mu$  на основе выходного сигнала  $y^{\mu-1}(t)$  страты  $S^{\mu-1}$  с использованием модели сопряжения  $\langle K^\mu, C^\mu, R^\mu \rangle$ , можно описать с помощью фиктивной страты  $\hat{S}^\mu$  следующим образом.

Входной сигнал любой страты БСС формируется исключительно из выходных элементарных сигналов страты  $S^{\mu-1}$ . Следовательно, каждому выходному сигналу  $y^{\mu-1}(t) \in Y^{\mu-1}$  страты  $S^{\mu-1}$  можно поставить в соответствие единственный, вполне определенный входной сигнал  $x^\mu(t) \in X^\mu$  страты  $S^\mu$ , и наоборот. Тогда, с формальной точки зрения, можно считать, что между любыми смежными стратами  $S^{\mu-1}$  и  $S^\mu$  расположена некоторая фиктивная страта  $\hat{S}^\mu$ , преобразующая выходные сигналы страты  $S^{\mu-1}$  в входные сигналы страты  $S^\mu$  в соответствии с матрицей  $A^\mu$ .

Введение фиктивных страт  $\hat{S}^\mu, \mu \in I = \{1, 2, \dots, k\}$  позволяет из рассмотренных моделей сопряжения элементов и страт в БСС перейти к эквивалентной, более удобной в теоретическом и прикладном отношении контактной модели сопряжения, которая предполагает передачу и прием сигналов страт непосредственно через их контакты, без элементарных каналов связи.

В рамках механизма обмена сигналами каждая фиктивная страта  $\hat{S}^\mu$  описывается множествами входных контактов  $\hat{K}^\mu = C^{\mu-1}$  и выходных контактов  $\hat{C}^\mu = K^\mu$ .

Функционирование каждой фиктивной страты  $\hat{S}^\mu$ , как временной статической системы без памяти [3], детерминировано и описывается оператором  $V^\mu$ :

$$x^\mu(t) = V^\mu(y^{\mu-1}(t)),$$

реализующим однозначное отображение  $Y^{\mu-1} \rightarrow X^\mu$ .

Показано [1], что входной сигнал  $x^\mu(t)$  страты  $S^\mu$  представляет собой результат операции умножения выходного сигнала (вектор-строки)  $y^{\mu-1}(t)$

страты  $S^{\mu-1}$  на матрицу  $A^\mu$ . Действительно, в результате умножения вектор-строки  $y^{\mu-1}$  на матрицу  $A^\mu$  получается вектор-строка  $x^\mu$ , каждый элемент  $x_{in}^\mu$  которой равен сумме произведений выходных элементарных сигналов  $y_{jl}^{\mu-1}$  страты  $S^{\mu-1}$  на соответствующие элементы столбца  $(i,n)$  матрицы  $A^\mu$ .

Каждый столбец  $A^\mu$  содержит только один единичный элемент, расположенный на пересечении данного столбца  $(i,n)$  и той строки  $(j,l)$ , соответствующий контакт  $c_{jl}^{\mu-1}$  которой соединен с контактом  $k_{in}^\mu$  элементарным каналом связи. Следовательно, каждый элемент  $x_{in}^\mu$  вектор-строки  $x^\mu$  равен тому элементу  $y_{jl}^{\mu-1}$  вектор-строки  $y^{\mu-1}$ , который при вычислении  $x_{in}^\mu$  умножается на единичный элемент столбца  $(i,n)$  (остальные элементы вектор-строки  $y^{\mu-1}$  умножаются на нуль).

Таким образом, установлено, что оператор  $V^\mu$ , ставящий в соответствие каждому выходному сигналу  $y^{\mu-1}(t) \in Y^{\mu-1}$  страты  $S^{\mu-1}$  входной сигнал  $x^\mu(t) \in X^\mu$  страты  $S^\mu$ , реализует операцию умножения вектор-строки  $y^{\mu-1}(t)$  на матрицу  $A^\mu$ :

$$x^\mu(t) = y^{\mu-1}(t) \cdot A^\mu = (y_1^{\mu-1}(t), y_2^{\mu-1}(t), \dots, y_{p_{\mu-1}}^{\mu-1}(t)) \cdot A^\mu. \quad (1)$$

Одно из привлекательных с практической точки зрения свойств фиктивных страт  $\hat{S}^\mu$  заключается в том, что каждый оператор  $V^\mu$  можно представить в виде совокупности независимых друг от друга операторов  $V_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$ , каждый из которых реализует отображение  $x_i^\mu(t) = V_i^\mu(y^{\mu-1}(t))$ .

Для определения вида каждого оператора  $V_i^\mu$  представим матрицу  $A^\mu$  через блоки  $A_i^\mu$ ,  $i \in I^\mu$  и подставим в (1):

$$x^\mu(t) = [y^{\mu-1}(t) \cdot A_1^\mu \vdots y^{\mu-1}(t) \cdot A_2^\mu \vdots \dots \vdots y^{\mu-1}(t) \cdot A_{p_\mu}^\mu]. \quad (2)$$

С другой стороны, имеем

$$x^\mu(t) = (x_1^\mu(t), x_2^\mu(t), \dots, x_{p_\mu}^\mu(t)). \quad (3)$$

При сопоставлении соотношений (2) и (3) становится очевидным, что каждый оператор  $V_i^\mu$  реализует операцию умножения выходного сигнала (вектор-строки)  $y^{\mu-1}(t)$  страты  $S^{\mu-1}$  на соответствующую матрицу  $A_i^\mu$ :

$$x_i^\mu(t) = y_i^{\mu-1}(t) \cdot A_i^\mu.$$

То обстоятельство, что каждый оператор  $V^\mu$  допускает декомпозицию на независимые друг от друга операторы  $V_i^\mu, i \in I^\mu$ , предоставляет возможность распараллеливать процесс имитации передачи сигналов от любой страты  $S^{\mu-1}$  к страте  $S^\mu$ .

Таким образом, процедура имитации сопряжения элементов любых смежных страт  $S^\mu$  и  $S^{\mu-1}$  в БСС сводится к реализации стандартной операции умножения матриц, допускающей распараллеливание процесса имитации сопряжения.

БСС была использована при построении имитационной модели центра обработки данных (ЦОД) коммерческого банка, укрупненная блок-схема которой приведена на рис.2.

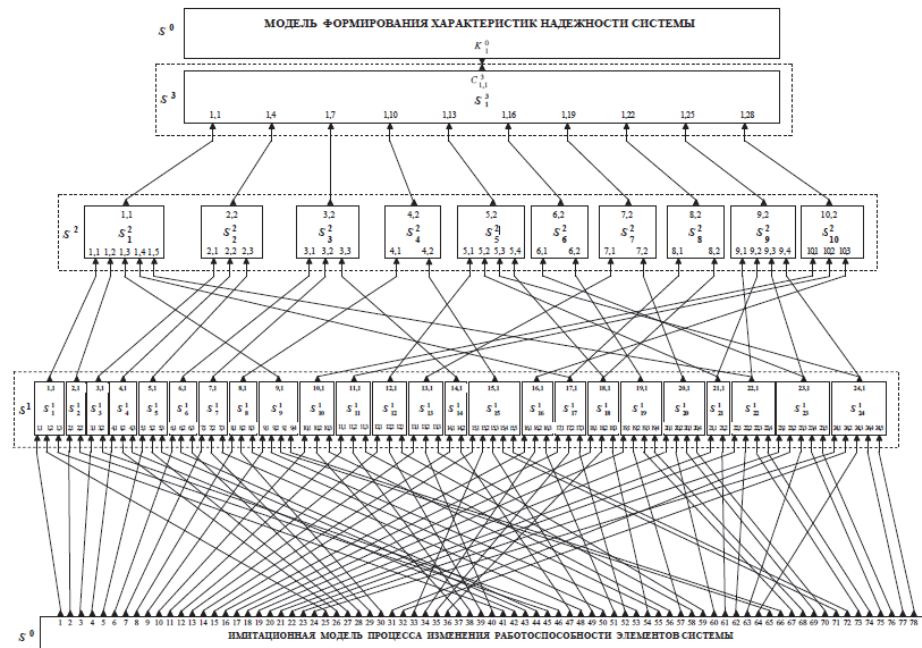


Рис. 2. Укрупненная блок-схема имитационной модели ЦОД банка

**Выводы.** С применением стратифицированного подхода разработана компьютерная модель для оценки и анализа надежности ССС, позволяющая: преодолеть сложность формализации определенного класса ССС с пространством состояний большой размерности при оценке и исследовании надежности; разработать удобную модель сопряжения их элементов, реализующую имитацию сопряжения элементов смежных страт посредством стандартной операции умножения матриц, что предоставляет возможность легко переходить к различным модификациям компьютерной модели системы в процессе имитационного эксперимента; распараллеливать процесс имитации функционирования элементов каждой страты при реализации модели на многопроцессорных компьютерах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баласанян С.Ш.** Стратифицированное моделирование сложных технологических систем: Монография.- Саарбрукен, Германия: LAP Lambert Academic Publishing, ISBN 978-3-659-54725-6, 2016.-380 с.
2. **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
3. **Месарович М., Такахара И.** Общая теория систем: математические основы. – М., 1978. – 311 с.
4. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. – 2-е изд. – М.: Наука, 1978.– 400 с.

#### Ս.Շ. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ, Վ.Ս. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ, Հ.Մ.ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

#### ԲԱՐԴ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՈՎ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՀՈՒՍԱԼՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ՔՈՄՓՅՈՒԹԵՐԱՅԻՆ ՇԵՐՏԱՎՈՐ ՄՈԴԵԼ

Առաջարկվում է բարդ կառուցվածքով տեխնիկական համակարգերի հուսալիության գնահատման և հետազոտման ընդհանրական շերտավոր մոդել: Մշակված է առաջարկվող մոդելում տարրերի լծորդման քումփյութերային մոդել, որը թույլ է տալիս հարակից շերտավորումների տարրերի լծորդումը հանգեցնել մատրիցների բազմապատկման ստանդարտ գործողությանը: Ցույց է տրված, որ առաջարկվող լծորդման մոդելը թույլատրում է զուգահեռականացնել յուրաքանչյուր շերտավորման տարրերի ազդանշանները հաջորդի տարրերին հաղորդման նմանակման գործընթացը, ինչը թույլ է տալիս բազմապրոցեսորային քումփյութերների կիրառության դեպքում էականորեն արագացնել նմանակման գործընթացը: Առաջարկվող ընդհանրական մոդելի՝ որպես ձևայնացման սխեմայի կիրառումը թույլ է տալիս էականորեն պարզեցնել և արագացնել բարդ կառուցվածքով համակարգերի հուսալիության քումփյութերային մոդելի կառուցումը՝ ապահովելով նմանակային գիտափորձերի անցկացման հարմարավետությունը:

**Առանցքային բաներ.** վիճակ, շերտավոր մոդել, շերտավորում, հուսալիություն, լծորդում, նմանակում:

**S.SH. BALASANYAN, V.SH. BALASANYAN, H.M. GEVORGYAN**  
**A COMPUTER STRATIFIED MODEL FOR ASSESSMENT AND**  
**ANALYSIS OF RELIABILITY OF STRUCTURALLY COMPLEX**  
**SYSTEMS**

A generalized stratified model is proposed to evaluate and analyze the reliability of structurally complex technical systems. A computer model for conjugating the elements in the proposed model has been developed, which makes it possible to reduce the simulation of conjugation of the adjacent strata elements of the standard matrix multiplication operation. It is shown that the proposed model allows for parallelization of the process of simulating the transmission of signals from the elements of each stratum to the elements of the subsequent stratum, which makes it possible to significantly speed up the simulation process when using multiprocessor computers. Application of the proposed model as a formalization scheme makes it possible to significantly simplify and accelerate the construction of a computer model for the reliability of structurally complex systems, providing the convenience of carrying out simulation experiments.

**Keywords:** state, stratified, strata, reliability, conjugation, simulation.

ՀՏԴ 681.5:378

**Կ.Ա. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ, Լ.Ս. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ**  
**ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՈՒՍՈՒՑՈՂԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ**  
**ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՄԱՆ ՈՒՂԻՆԵՐԸ**

Քննարկվում են ժամանակակից ավտոմատացված ուսուցողական համակարգերի (ԱՈՒՀ) կատարելագործման ուղիները և օգտագործման հնարավորությունները: Առաջարկվում է կրթական գործընթացը ներկայացնել որպես կառավարման համակարգ: Ուսուցման որակը բարձրացնելու համար առաջարկվում է կիրառել ուսուցման ադապտացված ալգորիթմը:

**Առանցքյին բառեր.** ավտոմատացված ուսուցողական համակարգ (ԱՈՒՀ), ուսուցման ադապտացված ալգորիթմ, ինֆորմացիայի մտապահման բնական պրոցեսներ, էքսինհաուզի կոր:

**Ներածություն.** Ժամանակակից արագ փոփոխվող տեխնոլոգիաների աշխարհում ուսուցումը դառնում է ողջ կյանքի ընթացքում իրականացվող գործողություն: Ներկայումս տեղեկատվական տեխնոլոգիաները լայն հնարավորություններ են տալիս հեռահար ուսուցում կազմակերպելու և բարձրագույն կրթությունը մատչելի դարձնելու համար: Հեռահար ուսուցումն իր հերթին հնարավորություն կտա ստանալ համապատասխան որակավորում նաև այն մարդկանց,