

результате численного решения укороченных уравнений для экспериментального автогенератора. Решение проводилось методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Исследовался синхронизированный на основном тоне автогенератора с параметрами  $f_0 = 50 \text{ kHz}$ ,  $\varepsilon = 1.7 \times 10^{-3}$ ,  $R = 7.5 \text{ k}\Omega$ ,  $u_0 = -1 \text{ V}$ ,  $K = 0.16$ ,  $I_c = 8 \mu\text{A}$ ,  $\delta = 0.0213$ ,  $B/\alpha = 0.133$ . Проходная динамическая характеристика его усилительного элемента аппроксимировалась полиномом  $i = 1.538 + 1.302u_c - 0.356u_c^2 - 0.502u_c^3 - 0.098u_c^4 \text{ mA}$ .

Для экспериментальной проверки теоретической зависимости производился анализ характера изменения погрешности определения сдвига фазы в полосе синхронизации. Изменение крутизны в процессе эксперимента достигалось искусственным нагревом усилительного элемента. Различие между теорией и экспериментом в полосе синхронизации представлено на рис. 2, где  $(\Delta\omega/\omega_0)_H$  - нормированная расстройка, отношение текущей расстройки к максимальной ее величине.

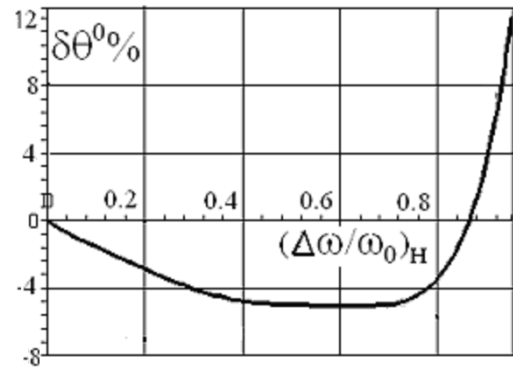


Рис. 2. Несоответствие расчетных и экспериментальных данных.

Характер изменения представленной зависимости подтверждает теоретически полученную, которая описывается тригонометрической функцией  $tg$ . Легко видеть, что резкое возрастание различия расчета и эксперимента начинается при значении эквивалентной нормированной расстройки равной приблизительно 0.76, что соответствует углу сдвига фазы равному  $50^\circ$ .

Из теоретических соотношений следует, что для автогенератора, синхронизированного на основном тоне, резкое возрастание погрешности должно начаться с того момента когда значение  $tg(\theta^0)$  превысит 1, т.е. когда  $\theta^0$  превысит значение равное  $45^\circ$ . Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных означает достаточно малую погрешность выражений, описывающих флуктуации сдвига фазы сигнала автогенератора.

**Список литературы:** 1. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. –М.: Наука, 1968, -660 с. 2. Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. –М.: Наука, 1960, -550 с. 3. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. –М.: Наука, 1976, -494 с

Поступила в редколлегию 15.02.2012

УДК 621.37/39.029

**А.А. АНДРУСЕВИЧ**, канд.техн.наук, доц., ХНУРЭ, Харьков,  
**И.Ш. НЕВЛЮДОВ**, докт.техн.наук, проф., зав.каф., ХНУРЭ, Харьков,  
**И.В. ЖАРИКОВА**, ассис., ХНУРЭ, Харьков

### МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Проанализированы характеристики существующих систем диагностики и контроля технологического оборудования. Рассмотрены эффективность систем диагностики и контроля

системы управления технологическим оборудованием и методы моделирования цифровых устройств таких систем.

Ключевые слова: радиоэлектронные средства, мониторинг жизненного цикла, система управления технологическим оборудованием, автоматизированная система контроля.

## **1. Введение**

К числу наиболее важных функций мониторинга жизненного цикла (ЖЦ) наукоемкой продукции, реализуемых в настоящее время, относится контроль и прогнозирование состояния РЭС и процессов обеспечения их ЖЦ [1]. Для сложных систем, в том числе и ЖЦ РЭС, возникает необходимость принятия решений в ситуации отсутствия формальных методов постановки и решения задач, возникающих в ЖЦ РЭС. В таком случае мониторинг, способный отображать суть происходящих в ЖЦ РЭС процессов, позволяя строить математические и логические модели, становится действенным инструментом обеспечения ЖЦ РЭС.

Таким образом, разработка теоретических основ мониторинга, дающего возможность оценивать и прогнозировать состояние процессов ЖЦ РЭС в условиях отсутствия формальных методов моделирования для обеспечения возможности принятия эффективных решений при поддержке ЖЦ РЭС, является актуальной научно-технической проблемой. Одной из важнейших задач в этом направлении является создание и использование информационных технологий для обеспечения и мониторинга показателей жизненного цикла в производстве РЭС.

## **2. Характеристики существующих систем диагностики и контроля технологического оборудования**

Основным объектом мониторинга показателей жизненного цикла в производстве РЭС являются производственные процессы, обеспечивающие сборку и монтаж [2]. В связи с этим представляется необходимым рассмотреть методы мониторинга технологического оборудования, как составную часть мониторинга производственной среды, обеспечивающей выполнение технологических операций сборки и монтажа РЭС, а также методы технологического мониторинга этих операций. Здесь мониторинг используется непосредственно для наладки, контроля, диагностики неисправностей и ремонта оборудования, являющегося, по сути, техническим обеспечением производственной среды.

Организация современных систем диагностики и контроля, включающих средства вычислительной техники и автоматизации, сталкивается с необходимостью стыковки разного, порой уникального, оборудования с ЭВМ. При этом должны быть согласованы функциональные и технические возможности самых разнообразных устройств в условиях многообразия и сложности решаемых задач [3-4]. Задача усложняется существованием множества возможных вариантов состава интерфейсного оборудования, соответствующего разным стандартам.

Особенности объекта диагностики (ОД) существенно влияют на характеристики проектируемой диагностической системы. Автоматизированная система контроля (АСК) может быть спроектирована для различных стадий

существования ОД: проектирование, производство, эксплуатация, которые так же значительно влияют на особенности системы.

АСК должна позволять оперативно создавать ДП и проводить диагностику и контроль – это необходимо для уменьшения простоев производственного оборудования и повышения эффективности его эксплуатации. Таким образом, АСК, используемая на этапе эксплуатации электронного оборудования, должна удовлетворять следующим общим требованиям:

- гибкость системы, позволяющая относительно быстро перестраиваться с одного ОД на другой;
- высокая достоверность результатов диагностики и контроля, снижающая требования к квалификации обслуживающего персонала;
- высокая производительность;
- самодиагностируемость системы;
- модульный принцип построения технических и программных средств, обеспечивающий свободу её развития.

Таковыми свойствами может обладать система, являющаяся совокупностью программных и аппаратных средств, построенной на основе персонального компьютера.

### **3. Эффективность систем диагностики и контроля системы управления технологическим оборудованием**

При выборе характеристик процесса диагностики и контроля цифровых модулей системы управления технологическим оборудованием (СУТО) учитываются особенности цифровых устройств, состоящие в том, что в них могут применяться различные методы диагностики и контроля, цифровые модули могут иметь различное количество электронных компонентов, корпуса элементов модулей могут быть различных видов (DIP, SOIC, SMD) и т. д.

Кроме того, системы диагностики и контроля взаимодействуют с потоками случайных событий – однократными и многократными отказами, вызванными какими-либо внешними причинами. При этом пропущенные, необнаруженные отказы электронных элементов поступают во внешнюю среду и могут привести к различным отрицательным последствиям.

Таким образом, рассматриваемая система состоит из трех объектов и обеспечивает вычислительный процесс  $C$

$$C(N, M, S), \quad (1)$$

где  $N$  – множество решаемых задач;

$M$  – структура математического обеспечения;

$S$  – структура аппаратного обеспечения.

Ошибки могут возникать при функционировании как математического обеспечения, так и аппаратного обеспечения, поэтому при решении одной определенной задачи частный показатель эффективности  $F_H$  выразится следующим образом

$$F_H = F(M) \wedge F(S), \quad (2)$$

где  $F(M)$  – эффективность математического обеспечения;

$F(S)$  – эффективность аппаратного обеспечения;

$\wedge$  – символ произведения.

В частности, с учетом независимости ошибок в этих объектах для вероятности безотказной работы  $P_H(t)$  запишем

$$P_H(t) = P_M(t) \cdot P_S(t), \quad (3)$$

где  $P_M(t)$  – вероятности безотказной работы математического обеспечения;

$P_S(t)$  – вероятности безотказной работы аппаратного обеспечения.

При выборе критериев эффективности систем диагностики и контроля необходимо исходить из анализа тех основных функций, для выполнения которых они предназначены. Оценка эффективности систем диагностики и контроля может производиться по следующим критериям, которые обеспечивают выполнение ряда требований:

- оперативность обнаружения неисправного элемента в цифровых модулях 1-го и 2-го порядка сложности;
- оперативность обнаружения неисправного элемента в модулях с регулярной структурой;
- оперативность обнаружения неисправного элемента в микропроцессорных модулях;
- оперативность обнаружения неисправного элемента при диагностике и контроле в условиях неопределенности;
- оперативность формирования тестовой последовательности;
- оперативность поиска контрольных точек;
- глубина поиска.

Для реализации всех вышеперечисленных требований необходимо решить определенные проблемы, которые состоят в самом описании систем управления процессом диагностики и контроля, учета в этом описании не только его специфической структуры, но и возможности изменений некоторых характеристик систем управления этим процессом во времени. Можно сформулировать ряд задач для реализации такого подхода:

- разработка метода принудительной диагностики цифровых модулей;
- разработка метода оперативного поиска контрольных точек цифровых модулей;
- модификация и формализация метода экспертной классификации наличия отказа в микропроцессорных системах;
- модификация и формализация метода автоматизированного формирования диагностических тестов на основе рабочих воздействий;
- усовершенствование метода троичного моделирования цифровых систем;
- разработка программного и аппаратного обеспечения технологического комплекса диагностики и контроля СУТО.

#### **4. Моделирование цифровых устройств СУТО**

Для анализа и синтеза цифровых устройств СУТО используют разнообразные методы и модели [5-6]. При анализе дискретных устройств и систем, описываемых уравнениями логического типа, обычно выделяют четыре уровня моделирования: системный, алгоритмический, логический и уровень элементарных вентилях.

Для оптимальной реализации процесса диагностики и контроля необходимо четко определить два существующих типа контроля электронных систем

технологического оборудования – технический контроль при разработке и изготовлении отдельных цифровых модулей и технический контроль при ремонте и наладке после определенного времени наработки.

Для решения задач поиска неисправности в СУТО желательно, чтобы применялся принцип «сверху вниз», при котором средства моделирования всех уровней учитывают требования технического контроля. Этого требует введение соответствующих описаний способов внесения в них нарушений и разработки эффективных методов их анализа.

Существующие в настоящее время модели для описания диагностических систем информационно-логического типа, как правило, используют только одно отношение, а именно бинарное отношение типа «тест-неисправность». Бинарным отношением  $R$  на множестве  $M$  называется подмножество  $R$  всех упорядоченных пар, принадлежащее  $M \times M$ . Бинарное отношение может задаваться различными способами: матрицами, ориентированными графами, сечениями.

В модели, связывающей неисправности с тестами, система представлялась как несвязанная группа функциональных элементов, вследствие чего связь «тест-неисправность» заменялась связью «тест-элемент», а сама неисправность рассматривалась, как неспособность элементов выполнять заданную функцию. Эта связь моделировалась путем сопоставления каждому тесту последовательности из  $N$  двоичных цифр, где каждая цифра соответствует элементу системы, причем  $k$ -я цифра равна 0, если тест проверяет  $k$ -й элемент, и 1, если тест не обнаруживает неисправность.

Развивается этот подход в направлении использования теоретико-информационных методов для оценки количества информации, которую несет тест, и выбора оптимальной последовательности тестов. Предполагается, что в системе имеется  $n$  неисправностей и  $m$  тестов для их обнаружения. Элемент  $d_{ij}$  таблицы равен 1, если тест  $t_j$  не проходит при неисправности  $f_i$ , и равен 0, если тест  $t_j$  проходит при неисправности. При этом решалась задача определения различимости неисправностей, а модель применялась при выборе оптимальной системы тестов.

Другие модели были использованы для комбинационных сетей. Применяемая модель представляет собой таблицу неисправностей, имеющую строку для каждой входной комбинации и столбец для исправной и всех неисправных сетей. Осуществляется переход от таблицы неисправностей к дополнительным матрицам. Используется также взвешивание матрицы определенными «весами». Затем эти модели были обобщены в ряде работ применительно к логическим сетям, имеющим несколько выходов и выдающим реакции на тесты иначе, чем «проход-непроход».

Указанные модели, за исключением первой, предполагали, что неисправность представляет собой особое детерминированное нарушение в пределах элемента или модуля вроде тождественного равенства нулю либо единице определенной линии.

Первые модели, принадлежащие концепции «тест-элемент», описывают класс вычислительных систем с самодиагностикой. Так, показывается, что вычислительная система  $S$  обладает возможностью самодиагностики, если ее

можно разделить на  $n$  взаимоисключающих дискретных подсистем  $S_{i,i} = 1, \dots, n$ , таких что для них выполняются следующие условия.

Диагностируемость подсистем  $S_{i,i} = 1, \dots, n$ . Для каждой подсистемы  $S_i$  должна быть известна серия входных воздействий и эталонных реакций на них.

Среди подсистем  $S_{i,i} = 1, \dots, n$  существуют диагностирующие подсистемы  $S_{id}$ , способные выполнять следующие функции:  $f_1$  – подачи на вход проверяемой системы контролирующего набора;  $f_2$  – анализа реакции подсистем  $S_i$  путем сравнения ее с эталонной;  $f_3$  – переход в зависимости от результата анализа предыдущей операции к следующему контролирующему прибору;  $f_4$  – останов с индикацией места отказа.

Подсистемы  $S_i$  и  $S_{id}$  должны быть связаны между собой.

Гарантирована работоспособность хотя бы одной диагностирующей подсистемы.

Несмотря на полезность этой модели, она не относится к числу чисто формальных, а содержит описательные элементы.

Отношение «тест-неисправность» (тест понимается в широком смысле – один набор, последовательность, либо аппаратная реализация) задается в виде диагностического графа. Каждому блоку соответствует вершина графа  $d_{ij}$ , вершины графа соединяются дугой  $b_{ij}$ , если устройство  $u_i$  проверяет устройство  $u_j$ .

Вес ветви равен  $a_{ij}$ , причем  $a_{ij}=0$ , если  $u_i$  исправно в предположении, что  $u_j$  исправно;  $a_{ij}=1$ , если  $u_i$  неисправно в предположении, что  $u_j$  исправно;  $a_{ij}=x$ , если предполагается, что  $u_j$  неисправно. От графа осуществляется переход к матрице связности.

С помощью этой модели была определена категория  $t$ -проверяемость в предположении одно- и многошагового проведения системы тестов. Под  $t$ -проверяемостью понимается способность системы выдавать уверенный результат проверки в предположении, что  $t$  блоков неисправно.

Этот подход был развит в последующих работах, где учитывалось, какие именно неисправности делают тест недействительным, вводились параметры структуры системы и устанавливалась их связь с  $t$ -проверяемостью. Там же разрабатывались алгоритмы для определения  $t$ -проверяемости непосредственно по структуре системы.

Основные трудности, возникающие при анализе диагностических моделей, состоят в том, что необходимо перечислить все неисправности, число которых может быть весьма значительным. Необходимо одновременно рассматривать математические модели неисправностей, математические модели объекта диагностики и организацию способа их взаимодействия для сохранения адекватности.

В настоящее время моделирование на ЭВМ функционирования цифровых устройств стало неотъемлемой частью программного обеспечения систем управления диагностикой. Можно выделить четыре уровня моделирования:

- анализ электронных схем (на уровне резисторов, транзисторов и т. д.);
- моделирование на уровне логических элементов;

- моделирование на уровне регистровых передач;
- эмуляционное моделирование на системном уровне.

В соответствии с вышеизложенным, при моделировании микропроцессорных систем необходимо использовать три уровня описания:

- алгоритмический;
- функциональный;
- вентильный.

Полное математическое описание строится по линейному принципу

$$L = L_{\text{ав}} + L_{\text{фв}} + L_{\text{ав}} , \quad (4)$$

где  $L_{\text{вв}}$  – язык вентильного уровня;

$L_{\text{фв}}$  – язык функционального уровня;

$L_{\text{ав}}$  – язык алгоритмического уровня.

Многоуровневая модель выглядит следующим образом

$$L = L_{\text{ав}} ( L_{\text{фв}} ( L_{\text{ав}} ) ) . \quad (5)$$

Такая последовательность создания диагностических тестов, как показала практика, является наиболее оптимальной с точки зрения снижения трудоемкости и уменьшения временных характеристик процесса диагностики СУТО. Это связано с тем, что на каждом этапе создания тестовых наборов, тестовые алгоритмы осуществляют поиск неисправности с заданным уровнем детализации.

Таким образом, происходит ступенчатое углубление детализации. На рис. 1 показан процесс поиска единичной неисправности системы СУТО, на рис. 2 – процесс поиска кратных неисправностей одного структурного модуля, на рис. 3 – процесс поиска независимых неисправностей в различных модулях.



Рис. 1. Модель процесса поиска одиночной неисправности модуля

Исходя из многоуровневой структуры модели для каждой системы УЧПУ формируется специальный последовательный алгоритм диагностики – нумерационный тест. Нумерационный тест строится в следующей последовательности:

- создаются математические модели отдельных микропроцессорных блоков верхнего уровня;

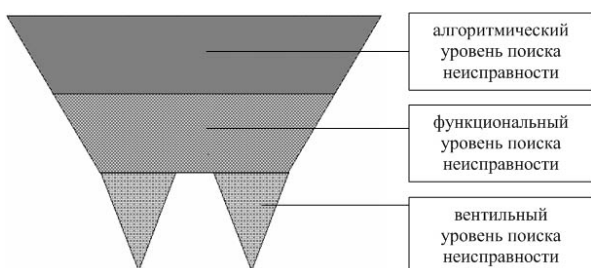


Рис. 2. Модель процесса поиска кратных неисправностей в модуле.

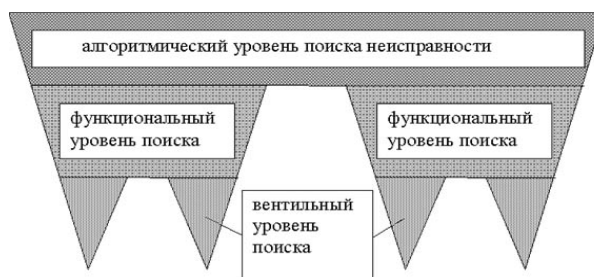


Рис. 3. Модель процесса поиска независимых неисправностей в различных модулях

- выделяются элементы описания соответствующего уровня, для чего осуществляется декомпозиция на алгоритмические блоки, функциональные узлы, логические элементы;

- на множестве дефектов с использованием отношения эквивалентности выделяются классы эквивалентных дефектов;

- классы дефектов упорядочиваются, в результате чего получается решетчатая модель, которая в совокупности с математической образуют диагностическую модель отдельного микропроцессорного блока;

- для каждого класса эквивалентных дефектов определяется идентификатор;

- производится построение теста путем размещения идентификаторов в соответствии с расположением элементов решетчатой модели;

- осуществляется переход к более низкому уровню описания того элемента объекта диагностики для которого глубина поиска дефекта недостаточна.

В общем случае описание такой трехуровневой диагностической модели (ДМ) представляется в следующем виде

$$\ddot{A}I = (\dot{I} ; \hat{A}), \quad (6)$$

где  $M$  – математическая модель системы, представленная в виде

$$\dot{I} = (S; BAS; J),$$

где  $S$  – структурная схема СУТО;

$BAS$  – базис микропроцессорной системы (заданный в виде набора команд микропроцессора и набора правил преобразования информации в каждом структурном модуле системы СУТО);

$J$  – интерпретация схемы  $S$  в базисе  $BAS$ ;

$B$  – решетчатая модель системы СУТО, полученная в результате упорядочивания классов эквивалентных дефектов.

ДМ задается в неявном виде: математическое описание исправной системы СУТО, физические дефекты и правила получения всех других описаний объекта.

### **Выводы**

Рассмотренные методы абстрактно моделируют процесс функционирования исправного или соответственно, неисправного цифрового устройства. Абстрактные методы построения проверяющих тестов для цифровых модулей технологического оборудования основаны на задании модели конечного автомата исправного цифрового модуля. Проверяющие тесты, построенные такими методами, обнаруживают все неисправности, искажающие таблицы переходов и выходов автомата, в частности и те, которые увеличивают число его состояний не более чем на заданную величину. Это обуславливает высокую достоверность результатов диагностирования цифровых модулей такими методами. Однако из-за того, что цифровые модули являются конечными автоматами, эти методы применимы только для модулей небольшой сложности и могут быть использованы при построении тестов для отдельных блоков, на которые расчленяются реальные цифровые модули.

**Список литературы:** 1. Шептунов, С. А. Жизненный цикл продукции [Текст] / С. А. Шептунов. - М. : Янус-К, 2003. - 244 с. 2. Невлюдов, И. Ш. Термодинамическая модель жизненного цикла электронной аппаратуры [Текст] / И. Ш. Невлюдов, А. А. Андрусевич, С. В. Сотник // Вестник Академии инженерных наук Украины. - 2007. - №3 (33). - С. 132-135.



3. *Андрусевич, А. А.* Модели управления и контроля в ГАП приборов электронной техники [Текст] / А. А. Андрусевич, И. Ш. Невлюдов, Ю. М. Роздоловский // Авиационно-космическая техника и технология. Труды Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». - 2002. - № 33. - С. 225-228. 4. *Невлюдов, И. Ш.* Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии [Текст] / И. Ш. Невлюдов, А. А. Андрусевич, В. А. Палагин. - Харьков: Коллегиум, 2007. - 324 с. 5. *Андрусевич, А. А.* Синтез тестопригодных схем путем устранения функционально-структурной избыточности [Текст] / А. А. Андрусевич, И. Ш. Невлюдов, М. А. Бережная, М. Г. Рыжикова, Я. Ю. Королева // Вестник Академии инженерных наук Украины. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Жуковского «ХАИ». - 2006. - №3 (30). - С. 188-192. 6. *Андрусевич, А. А.* Синтез системы автоматизированной диагностики цифровых модулей технологического оборудования [Текст] / А. А. Андрусевич, И. Ш. Невлюдов, Б. А. Шостак // Вісті Академії Інженерних наук України. - 2004. - №4(24). - С. 125-132.

*Поступила в редколлегию 15.02.2012*

УДК 621.57.673:61

**Е.В. ВЫСОЦКАЯ**, канд.техн.наук, доц., ХНУРЭ, Харьков,  
**А.Н. СТРАШНЕНКО**, асп., ХНУРЭ, Харьков,  
**С.А. СИНЕНКО**, врач-офтальмолог, Городская клиническая больница  
№ 14 им. Л. Л. Гиршмана, Харьков,  
**Ю.А. ДЕМИН**, докт.мед.наук, проф., Медицинская академия  
последипломного образования, Харьков

## **СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИКИ ПЕРВИЧНОЙ ОТКРЫТОУГОЛЬНОЙ ГЛАУКОМЫ**

Дана стаття присвячена синтезу математичної моделі діагностики первинної відкритокутової глаукоми за допомогою дискримінантного аналізу, що дозволяє підвищити достовірність ранньої діагностики, тим самим сприяє своєчасному та якісному лікуванню

**Ключові слова:** математична модель, дискримінантний аналіз, первинна відкритокутова глаукома, діагностика

Данная статья посвящена синтезу математической модели диагностики первичной открытоугольной глаукомы с помощью дискриминантного анализа, позволяющей повысить достоверность ранней диагностики, что способствует своевременному и качественному лечению

**Ключевые слова:** математическая модель, дискриминантный анализ, первичная открытоугольная глаукома, диагностика

This article focuses on the synthesis of a mathematical model of diagnosis of primary open-angle glaucoma using discriminant analysis, which allows to increase the reliability of early diagnosis, which contributes to the timely and quality treatment

**Keywords:** mathematical model, discriminant analysis, primary open-angle glaucoma, diagnosis

### **1. Введение**

Во всем мире одной из основных причин слепоты и слабовидения является глаукома. Чаще всего (около 80%) больные страдают первичной открытоугольной глаукомой (ПОУГ). При этом болезнь развивается незаметно для больного и обнаруживает себя только тогда, когда появляются грубые нарушения зрительных функций (развитая стадия). В этих стадиях добиться стабилизации процесса становится очень трудно, если вообще возможно [1].