

УДК 629.039.58

В.В. Скляр

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ОШИБОК КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

В статье получена и исследована марковская модель информационно-управляющей системы (ИУС) с учетом рода и опасности ошибок контроля и с учетом отказов средств контроля. На основании предложенного подхода получен класс моделей, учитывающих различные типы ошибок контроля и управления в ИУС, а также отказы средств контроля и управления. Применение моделей направлено на оценивание надежности и функциональной безопасности ИУС.

**Ключевые слова:** информационно-управляющая система, функциональная безопасность, марковская модель.

### 1. Проблема анализа ИУС с учетом ошибок контроля и управления

Основными функциями информационно-управляющих систем (ИУС) является контроль и управление (КиУ).

Общая структура ИУС и ее взаимодействие с объектом контроля и управления (ОКУ) представлены на рис. 1. Устройство контроля (УК) идентифицирует состояние ОКУ и выдает информацию о состоянии ОКУ в устройство управления (УУ). УУ при необходимости переводит ОКУ в безопасное состояние. На рис. 1 представлены следующие информационные потоки:  $I_0$  – информация о состоянии ОКУ, передаваемая в УК,  $I_K$  – информация о состоянии ОКУ, передаваемая из УК в УУ,  $I_U$  – управляющая информация УУ, направленная на изменение состояния ОКУ [1].

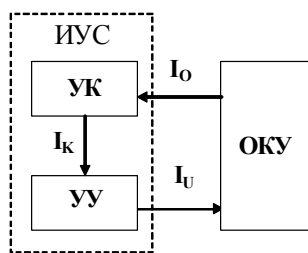


Рис. 1. Взаимодействие объекта контроля и управления с устройствами контроля и управления в составе ИУС

Для достоверной оценки надежности и функциональной безопасности ИУС необходимо учитывать ошибки КиУ [2]. Вопросы технического диагностирования важных для безопасности ИУС рассмотрены в работах [3].

В работе [4] дано определение ошибкам контроля и управления I, II и III рода. При ошибках контроля и управления III рода правильно определяется тип (подмножество состояний), однако непра-

вильно определяется состояние в рамках подмножества. В этом случае ошибки контроля и управления нельзя отнести ни к I, ни ко II роду, поскольку невозможно идентифицировать подобное событие ни как "ложное срабатывание", ни как "ложное несрабатывание". Кроме того, в [4] разработаны логические модели контроля и управления ИУС, учитывающих влияние ошибок контроля и управления на безопасность системы.

В настоящей статье представлены результаты дальнейшего развития теоретического аппарата анализа ИУС с учетом ошибок контроля и управления. Целью статьи является разработка и исследование марковских моделей ИУС с учетом ошибок контроля и управления.

### 2. Базовая марковская модель ошибок контроля ИУС

Рассмотрим марковскую модель ошибок контроля в общем виде. Такая модель представлена на рис. 2 и характеризуется следующими состояниями:  $S_0$  – начальное состояние; отказ – отказ системы; II – ошибки второго рода (скрытый отказ); ПТО – профилактическое техническое обслуживание.

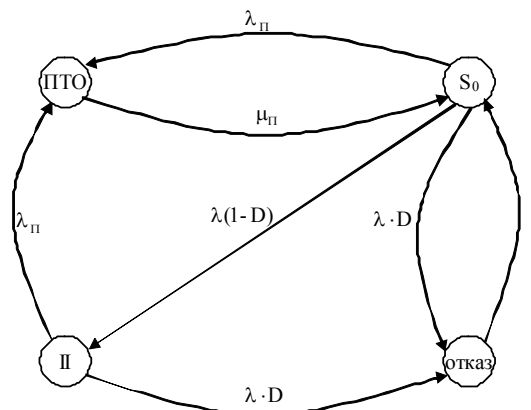


Рис. 2. Базовая марковская модель ошибок контроля ИУС

Для модели на рис. 2 используются следующие допущения:

- отказы распознаются с достоверностью контроля  $D$ ;
- достоверность контроля  $D$  учитывает, в том числе, методическую составляющую, то есть вероятность обнаружения отказов используемым методом;
- состояние отказа учитывает также ошибки контроля I и III рода;
- ошибки контроля II рода возникают с вероятностью, равной дополнению достоверности контроля до единицы  $(1 - D)$ ;
- при возникновении ошибки контроля II рода система может перейти либо в состояние распознанного отказа, либо в состояние ПТО;
- ПТО проводится с периодичностью  $T_{II} = 1 / \lambda_{II}$  и с длительностью  $T_{ВТО} = 1 / \mu_{II}$ .

Рассмотренная модель является приближенной, поскольку:

- не учитывает ошибки контроля I и III рода;
- не учитывает опасные и безопасные ошибки контроля.

### 3. Логические модели ИУС с учетом рода и опасности ошибок контроля

Для учета факторов, не рассмотренных в базовой марковской модели ошибок контроля ИУС (рис. 2), применим логические модели, учитывающие род и опасность ошибок контроля (рис. 3). Такие модели являются промежуточными, и позволяют перейти к разработке детальной марковской модели ИУС с учетом рода и опасности ошибок контроля (см. пункт 4).

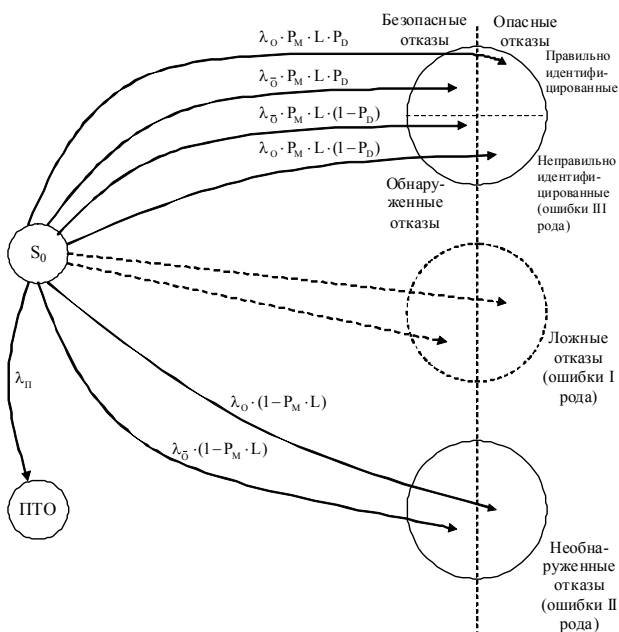


Рис. 3. Логическая модель ИУС с учетом рода и опасности ошибок контроля и без учета отказов средств контроля

Отказы системы с учетом их опасности и рода ошибок контроля представлены кругами в правой части модели. Отказы системы классифицированы следующим образом:

- обнаруженные отказы (верхний круг), ложные отказы, эквивалентные ошибкам контроля I рода (средний круг), необнаруженные отказы, эквивалентные ошибкам контроля II рода (нижний круг);
- безопасные отказы (левая часть каждого из кругов) и опасные отказы (правая часть каждого из кругов);
- правильно идентифицированные обнаруженные отказы (верхняя часть верхнего круга) и неправильно идентифицированные обнаруженные отказы эквивалентные ошибкам контроля III рода (нижняя часть верхнего круга).

Для интенсивностей переходов на рис. 3 использованы следующие обозначения:  $\lambda_{II}$  – интенсивность ПТО;  $\lambda_{\bar{O}}$  – интенсивность безопасного отказа;  $\lambda_{O}$  – интенсивность опасного отказа;  $P_M$  – вероятность обнаружения отказа, обусловленная применяемым методом контроля;  $L$  – полнота контроля;  $P_D$  – вероятность правильного определения причины отказа, обусловленная применяемым методом контроля. Следует отметить, что в рамках рассмотренной модели невозможно определить интенсивности ошибок I рода, поскольку такие события обусловлены отказами средств контроля, которые не учитываются для модели на рис. 3.

### 4. Марковская модель ИУС с учетом рода и опасности ошибок контроля и с учетом отказов средств контроля

Исследуемая марковская модель получена на основе логических моделей ИУС. В полученной модели не учтены отказы средств поиска дефектов, поскольку их влияние на формирование множества состояний системы, описываемой марковским графом, незначительно вследствие, с одной стороны, малой вероятности соответствующих событий, а с другой, – того, что такие отказы в большей степени характерны для диагностической аппаратуры, работающей в периоды профилактики. Модель включает следующие состояния (рис. 4):  $S_0$  – исходное состояние;  $S_{\bar{O}I}$  – безопасная ошибка контроля I рода;  $S_{OI}$  – опасная ошибка контроля I рода;  $S_{\bar{O}II}$  – безопасная ошибка контроля II рода;  $S_{OII}$  – опасная ошибка контроля II рода;  $S_{\bar{O}III}$  – безопасная ошибка контроля III рода;  $S_{OIII}$  – опасная ошибка контроля III рода;  $S_{\bar{O}D}$  – правильно распознанный безопасный отказ;  $S_{OD}$  – правильно распознанный

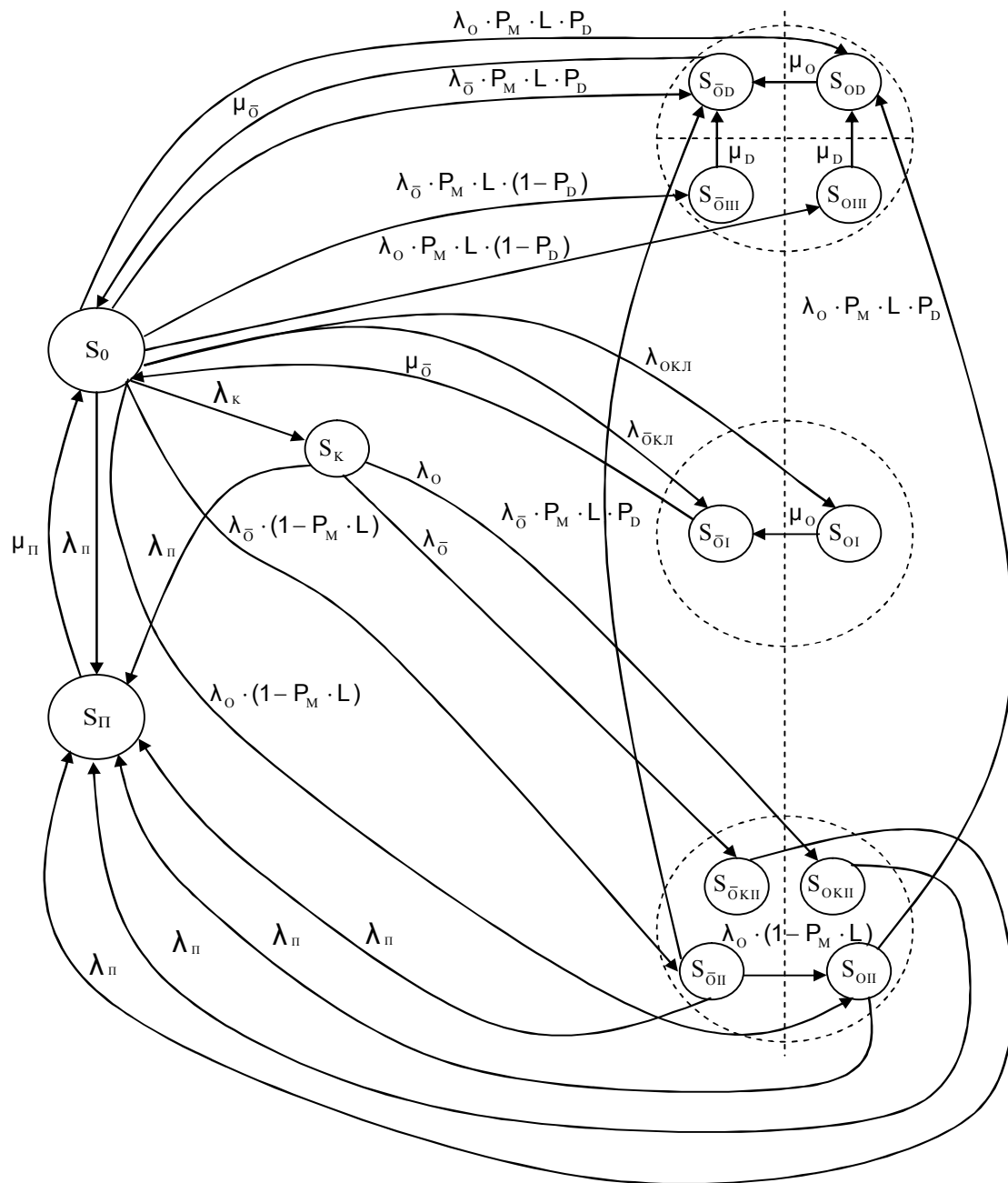


Рис. 4. Марковская модель ИУС с учетом рода и опасности ошибок контроля и с учетом отказов средств контроля

опасный отказ;  $S_K$  – отказ средств контроля;  $S_{\Pi}$  – состояние профилактического технического обслуживания.

Используемые в марковской модели обозначения интенсивностей отказов представлены в пункте 3. Кроме того, в марковской модели применяются следующие интенсивности восстановления:  $\mu_{\bar{0}}$  – интенсивность восстановления системы из безопасного неисправного состояния в исходное состояние  $S_0$ ;  $\mu_0$  – интенсивность восстановления системы из опасного состояния в безопасное состояние;  $\mu_D$  – интенсивность восстановления системы из состояния ошибки контроля III рода в состояние правильно распознанного отказа;  $\mu_t$  – интенсивность восста-

новления системы из состояния профилактики в исходное состояние  $S_0$ .

Для исследования данной модели предложен классический подход.

Сначала составляются и решаются уравнения Колмогорова в дифференциальной форме и оценивается период времени от начала функционирования до перехода в стационарный режим, а затем решаются уравнения Колмогорова в алгебраической форме и исследуются зависимости стационарных значений вероятностей состояний от параметров системы и процессов эксплуатации.

В соответствии с методикой расчета марковских процессов для графа на рис. 4 имеем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases}
 dP_0(t)/dt = -P_0(t) \cdot [(\lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot P_D + \lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot P_D + \lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot (1 - P_D) + \\
 + \lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot (1 - P_D) + \lambda_{\bar{OKL}} + \lambda_{OKL} + \lambda_K + \lambda_{\bar{O}} \cdot (1 - P_M \cdot L) + \lambda_O \cdot (1 - P_M \cdot L) + \lambda_{\Pi}] + \\
 + \mu_{\bar{O}} \cdot P_{\bar{OD}}(t) + \mu_{\bar{O}} \cdot P_{\bar{OI}}(t) + \mu_{\Pi 0} \cdot P_{\Pi 0}(t) ; \\
 dP_{\bar{OD}}(t)/dt = -\mu_{\bar{O}} \cdot P_{\bar{OD}}(t) + \lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot P_D \cdot P_0(t) + \mu_{\bar{O}} \cdot P_{\bar{OD}}(t) + \mu_D \cdot P_{\bar{OIII}}(t) + \lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot P_D \cdot P_{\bar{OII}}(t) ; \\
 dP_{OD}(t)/dt = -\mu_O \cdot P_{OD}(t) + \lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot P_D \cdot P_0(t) + \mu_D \cdot P_{OIII}(t) + \lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot P_D \cdot P_{OII}(t) ; \\
 dP_{\bar{OIII}}(t)/dt = -\mu_D \cdot P_{\bar{OIII}}(t) + \lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot (1 - P_D) \cdot P_0(t) ; \\
 dP_{OIII}(t)/dt = -\mu_D \cdot P_{OIII}(t) + \lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot (1 - P_D) \cdot P_0(t) ; \\
 dP_{\bar{OI}}(t)/dt = -\mu_{\bar{O}} \cdot P_{\bar{OI}}(t) + \lambda_{\bar{OKL}} \cdot P_0(t) ; \\
 dP_{OI}(t)/dt = -\mu_O \cdot P_{OI}(t) + \lambda_{OKL} \cdot P_0(t) ; \\
 dP_{\bar{OKII}}(t)/dt = -\lambda_{\Pi} \cdot P_{\bar{OKII}}(t) + \lambda_{\bar{O}} \cdot P_K(t) ; \\
 dP_{OKII}(t)/dt = -\lambda_{\Pi} \cdot P_{OKII}(t) + \lambda_O \cdot P_K(t) ; \\
 dP_{\bar{OII}}(t)/dt = -[\lambda_{\bar{O}} \cdot (1 - P_M \cdot L) + \lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot P_D + \lambda_{\Pi}] \cdot P_{\bar{OII}}(t) + \lambda_{\bar{O}} \cdot (1 - P_M \cdot L) \cdot P_0(t) ; \\
 dP_{OII}(t)/dt = -[\lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot P_D + \lambda_{\Pi}] \cdot P_{OII}(t) + \lambda_O \cdot (1 - P_M \cdot L) \cdot P_{\bar{OII}}(t) + \lambda_O \cdot (1 - P_M \cdot L) \cdot P_0(t) ; \\
 dP_K(t)/dt = -(\lambda_O + \lambda_{\bar{O}} + \lambda_{\Pi}) \cdot P_K(t) + \lambda_K \cdot P_0(t) ; \\
 dP_{\Pi 0}(t)/dt = -\mu_{\Pi 0} \cdot P_{\Pi 0}(t) + \lambda_{\Pi} \cdot P_0(t) + \mu_{\Pi 1} \cdot P_{\Pi 1}(t) ; \\
 dP_{\Pi 1}(t)/dt = -\mu_{\Pi 1} \cdot P_{\Pi 1}(t) + \lambda_{\Pi} \cdot P_K(t) + \lambda_{\Pi} \cdot P_{\bar{OKII}}(t) + \lambda_{\Pi} \cdot P_{OKII}(t) + \lambda_{\Pi} \cdot P_{\bar{OII}}(t) + \lambda_{\Pi} \cdot P_{OII}(t) .
 \end{cases} \tag{1}$$

Для решения системы дифференциальных уравнений (1) принимаем предположение о переходе системы в стационарный режим (производные равны нулю) и заменяем одно из уравнений (напри-

мер, первое) нормировочным соотношением (сумма вероятностей нахождения системы во всех состояниях равна единице). Тогда система алгебраических уравнений имеет вид (2).

$$\begin{cases}
 \lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot P_D \cdot P_0 - \mu_{\bar{O}} \cdot P_{\bar{OD}} + \mu_{\bar{O}} \cdot P_{\bar{OD}} + \mu_D \cdot P_{\bar{OIII}} + \lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot P_D \cdot P_{\bar{OII}} = 0 ; \\
 \lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot P_D \cdot P_0 - \mu_O \cdot P_{OD} + \mu_D \cdot P_{OIII} + \lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot P_D \cdot P_{OII} = 0 ; \\
 \lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot (1 - P_D) \cdot P_0 - \mu_D \cdot P_{\bar{OIII}} = 0 ; \\
 \lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot (1 - P_D) \cdot P_0 - \mu_D \cdot P_{OIII} = 0 ; \\
 \lambda_{\bar{OKL}} \cdot P_0 - \mu_{\bar{O}} \cdot P_{\bar{OI}} = 0 ; \\
 \lambda_{OKL} \cdot P_0 - \mu_O \cdot P_{OI} = 0 ; \\
 -\lambda_{\Pi} \cdot P_{\bar{OKII}} + \lambda_{\bar{O}} \cdot P_K = 0 ; \\
 -\lambda_{\Pi} \cdot P_{OKII} + \lambda_O \cdot P_K = 0 ; \\
 \lambda_{\bar{O}} \cdot (1 - P_M \cdot L) \cdot P_0 - [\lambda_{\bar{O}} \cdot (1 - P_M \cdot L) + \lambda_{\bar{O}} \cdot P_M \cdot L \cdot P_D + \lambda_{\Pi}] \cdot P_{\bar{OII}} = 0 ; \\
 \lambda_O \cdot (1 - P_M \cdot L) \cdot P_0 - [\lambda_O \cdot P_M \cdot L \cdot P_D + \lambda_{\Pi}] \cdot P_{OII} + \lambda_O \cdot (1 - P_M \cdot L) \cdot P_{\bar{OII}} = 0 ; \\
 \lambda_K \cdot P_0 - (\lambda_O + \lambda_{\bar{O}} + \lambda_{\Pi}) \cdot P_K = 0 ; \\
 \lambda_{\Pi} \cdot P_0 - \mu_{\Pi 0} \cdot P_{\Pi 0} + \mu_{\Pi 1} \cdot P_{\Pi 1} = 0 ; \\
 \lambda_{\Pi} \cdot P_{\bar{OKII}} + \lambda_{\Pi} \cdot P_{OKII} + \lambda_{\Pi} \cdot P_{\bar{OII}} + \lambda_{\Pi} \cdot P_{OII} + \lambda_{\Pi} \cdot P_K - \mu_{\Pi 1} \cdot P_{\Pi 1} = 0 ; \\
 P_0 + P_{\bar{OD}} + P_{OD} + P_{\bar{OIII}} + P_{OIII} + P_{\bar{OI}} + P_{OI} + P_{\bar{OKII}} + P_{OKII} + P_{\bar{OII}} + P_{OII} + P_K + P_{\Pi 0} + P_{\Pi 1} = 1 .
 \end{cases} \tag{2}$$

Для ИУС, описываемых САУ (2), могут быть определены следующие показатели готовности и безопасности:

$P_0$  – вероятность нахождения в работоспособном состоянии  $S_0$ ; при помощи многофрагментного подхода к разработке марковских моделей состояние  $S_0$  может быть описано отдельной моделью, включающей работоспособные состояния системы;

$K_{ТИ} = P_0 + P_K$  – коэффициент технического использования;

$K_{БТИ} = P_0 + P_K + P_{\bar{OI}} + P_{OII} + P_{\bar{OKII}} + P_{OIII} + P_{\bar{OD}} + P_{\Pi 0} + P_{\Pi 1}$  – коэффициент безопасного технического использования;

$K_{Г} = (P_0 + P_K) / (1 - P_{\Pi 0} - P_{\Pi 1})$  – коэффициент готовности;

$K_{ФБ} = (P_0 + P_K + P_{\bar{OI}} + P_{OII} + P_{\bar{OKII}} + P_{OIII} + P_{\bar{OD}}) / (1 - P_{\Pi 0} - P_{\Pi 1})$  – коэффициент функциональной безопасности;

$K_{ПИ} = 1 - P_{\Pi 0} - P_{\Pi 1}$  – коэффициент планового использования;

$K_{ПП} = P_{\Pi 0} + P_{\Pi 1}$  – коэффициент планового простоя.

## 5. Исследование марковских моделей ИУС с учетом ошибок контроля и управления

На основании анализа данных об опасных и безопасных отказах элементной базы, ПО и ошибках проектирования [5] для моделирования были выбраны следующие базовые значения интенсивностей отказов и восстановлений:

- интенсивность безопасного отказа  $\lambda_{\bar{0}} = 10^{-6}$  1/час;
- интенсивность опасного отказа  $\lambda_0 = 10^{-7}$  1/час;
- интенсивность безопасных ошибок контроля I рода  $\lambda_{\text{окл I}} = 10^{-6}$  1/час;
- интенсивность опасных ошибок контроля I рода  $\lambda_{\text{окл II}} = 10^{-7}$  1/час;
- интенсивность отказа средств контроля  $\lambda_{\text{к}} = 10^{-6}$  1/час;
- интенсивность профилактического технического обслуживания (ПТО)  $\lambda_{\text{п}} = 10^{-4}$  1/час;
- показатели полноты и достоверности контроля  $P_{\text{M}} = L = P_{\text{D}} = 0,9$ ;
- интенсивность восстановления системы из безопасного неисправного состояния  $\mu_{\bar{0}} = 1$  1/час;
- интенсивность восстановления системы из опасного состояния  $\mu_0 = 0,1$  1/час;
- интенсивность восстановления системы из состояния ошибки контроля III рода  $\mu_{\text{D}} = 1$  1/час;
- интенсивность восстановления системы из состояния профилактики  $\mu_{\text{п}} = 0,01$  1/час;
- коэффициент, определяющий отношение времени устранения отказов в ходе профилактики ко времени проведения профилактики без учета устранения отказов (коэффициент профилактики),  $K_{\text{п}} = 0 \div 1$ .

Анализ ИУС для критических приложений, таких как ИУС АЭС, результатов исследований изменения вероятностей нахождения систем в различных состояниях от времени [3], показывает, что:

а) для многих систем время переходных процессов (время перехода системы в режим, когда вероятность как функция времени изменяется несущественно, то есть принимает стационарное значение) невелико и может не учитываться;

б) для систем, в которых в процессе функционирования обнаруживаются и устраняются проектные (как правило, программные) дефекты, а следовательно, изменяются параметры потоков отказов и восстановлений [3], динамический режим (нестационарные значения вероятностей) необходимо исследовать.

Параметры модели (2) определяются надежностью компонентов ИУС. Единственным "гибким" параметром является интенсивность перехода в режим профилактики  $\lambda_{\text{п}}$ , которая задается нормативным путем. С одной стороны, увеличение  $\lambda_{\text{п}}$  приводит к устранению скрытых дефектов, и тем самым повышает надежность ИУС. С другой стороны, чрезмерное увеличение  $\lambda_{\text{п}}$  приводит к тому, что ИУС будет слишком большое время находится в состоянии профилактики. Таким образом, правомерным будет принятие гипотезы о существовании оптимального значения  $\lambda_{\text{п}}$ , при котором значения показателей готовности и безопасности достигают максимума. Следует отметить, что коэффициент планового использования и коэффициент планового простоя пред-

ставляют собой линейные зависимости от  $\lambda_{\text{п}}$ . Таким образом, их исследование с точки зрения поиска экстремума не представляет собой интереса.

Начнем исследование с анализа функции  $P_0(\lambda_{\text{п}})$ , которая включает вероятность нахождения в единственном состоянии  $S_0$ . Зададим экспоненциальный масштаб изменения  $\lambda_{\text{п}}$  в диапазоне от  $10^{-6}$  1/час до  $10^{-1}$  1/час, чтобы выявить сам факт наличия экстремума и, в случае его существования исследовать зависимости экстремального значения функции от параметров системы и процессов эксплуатации. Выполненное моделирование действительно подтвердило наличие экстремума в окрестности точки  $\lambda_{\text{п}} = 0,0001$  1/час.

Для точного определения значения максимума исследуем зависимость  $P_0(\lambda_{\text{п}})$  в диапазоне  $\lambda_{\text{п}} = 10^{-4}, \dots, 3 \cdot 10^{-4}$  1/час. Экстремальное значение  $\lambda_{\text{п}}$  определено с точностью до  $10^{-5}$  и составляет  $\lambda_{\text{п}} = 0,00015$  1/час, что соответствует проведению профилактики с периодичностью ТПТО = 6667 час (около 9 календарных месяцев), при этом  $P_0(0,00015) = 0,970335$ .

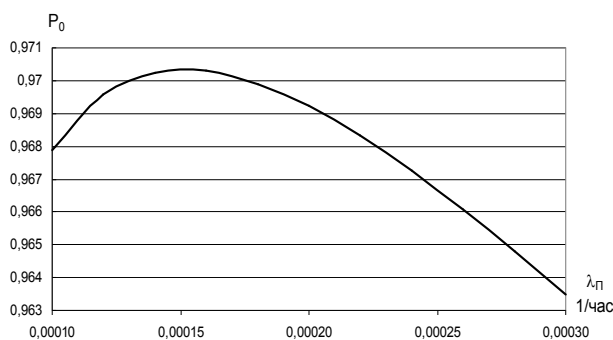


Рис. 5. Зависимость вероятности нахождения в работоспособном состоянии от интенсивности профилактики

Исследуем влияние коэффициента профилактики  $K_{\text{п}}$  на значение вероятности нахождения в работоспособном состоянии  $P_0$ . Для этого будем рассматривать  $P_0(\lambda_{\text{п}}, K_{\text{п}})$ , как функцию двух переменных. Значение  $\lambda_{\text{п}}$  по-прежнему меняем в диапазоне от 0,0001 до 0,0003 с шагом 0,00002, а значение  $K_{\text{п}}$  меняем от 0 до 1 с шагом 0,2 (рис. 6).

Анализ результатов проведенного исследования зависимости  $P_0(\lambda_{\text{п}}, K_{\text{п}})$  позволяет сделать следующие выводы [4, 5]:

1) при увеличении значения  $K_{\text{п}}$  увеличивается значение  $P_0$  при фиксированном значении  $\lambda_{\text{п}}$ ; это объясняется тем, что происходит "перетекание" состояния  $S_{\text{п0}}$  в состояние  $S_{\text{п1}}$ , в то же время, вероятность нахождения в состоянии  $S_{\text{п1}}$  значительно меньше вероятности нахождения в состоянии  $S_{\text{п0}}$  (отказы, которые устраняются в состоянии  $S_{\text{п1}}$ , являются редкими событиями), а это приводит к тому, что значение  $P_0$  увеличивается за счет уменьшения времени и вероятности нахождения в состоянии профилактики;

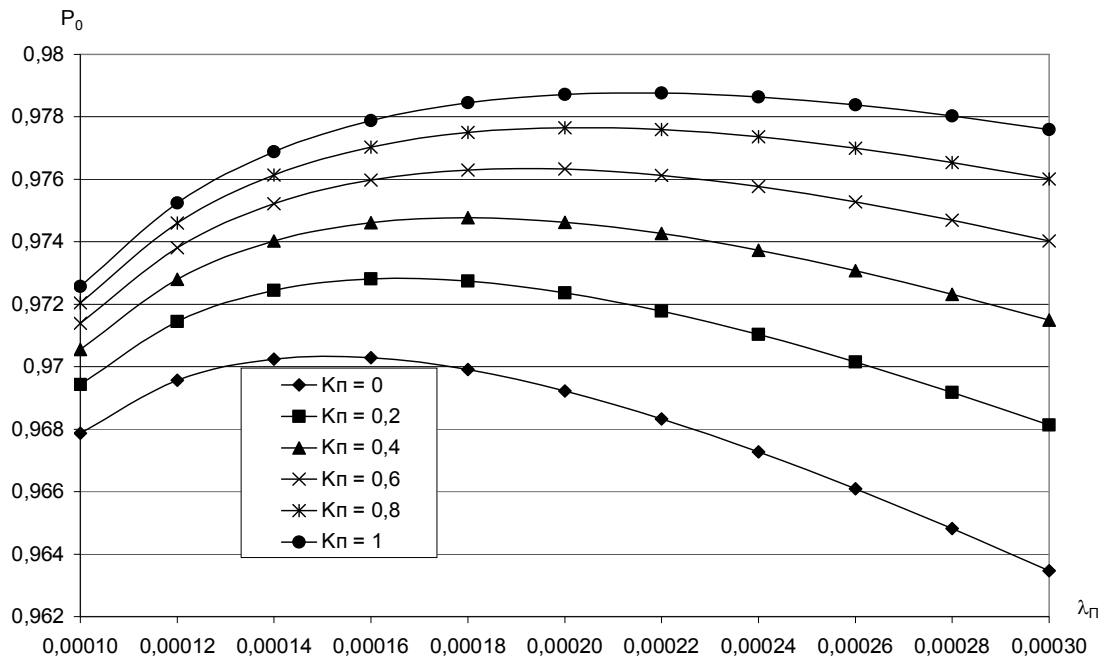


Рис. 6. Залежності ймовірності знаходження в робочому стані від інтенсивності профілактики при зміні значення коефіцієнта профілактики

2) при збільшенні значення  $K_{\text{П}}$  значення максимуму  $P_0$  зсувається в сторону збільшення  $\lambda_{\text{П}}$ ;

3) при збільшенні значення  $K_{\text{П}}$  максимум  $P_0$  стає менш вигнутим, і фактично графік  $P_0(\lambda_{\text{П}}, K_{\text{П}} = 1)$  може бути апроксимований в околицях максимуму прямою, паралельною осі абсцис; таким чином при збільшенні значення  $K_{\text{П}}$  немає потреби в строгому утриманні міжпрофілактичних діапазонів, оскільки в певній околиці екстремуму значення  $\lambda_{\text{П}}$  практично не впливає на значення  $P_0$ .

Проведемо порівняльний аналіз чисельних значень і функціональних залежностей від значення  $\lambda_{\text{П}}$  (при фіксованому значенні  $K_{\text{П}} = 0$ ) для досліджуваних показників готовності і безпеки ( $P_0$ ,  $K_{\text{ТИ}}$ ,  $K_{\text{БТИ}}$ ,  $K_{\text{ФБ}}$ ,  $K_{\text{Г}}$ ).

Як показали результати дослідження, оптимізація за параметром  $\lambda_{\text{П}}$  може бути виконана лише для показників  $P_0$  і  $K_{\text{ТИ}}$ , оскільки вони враховують стани профілактики.

При цьому значення максимуму для  $K_{\text{ТИ}}$  і настає раніше, ніж для  $P_0$ , і максимум для  $K_{\text{ТИ}}$  має менш вигнуту форму.

Значення  $K_{\text{БТИ}}$  і  $K_{\text{ФБ}}$  практично збігаються, хоча ці показники враховують різні стани. Це пояснюється тим, що обидва показники близькі до одиниці, а різниця між ними заключається в станах, ймовірність знаходження в яких дуже низька.

$K_{\text{Г}}(\lambda_{\text{П}})$  і  $K_{\text{БТИ}}(\lambda_{\text{П}}) \approx K_{\text{ФБ}}(\lambda_{\text{П}})$  є монотонно зростаючими функціями, оскільки не враховують стани профілактики (лише косвенним чином через значення  $P_0$ ). По тій же причині значення цих

показників не залежать від значення  $K_{\text{П}}$ .

$K_{\text{БТИ}}$  і  $K_{\text{ФБ}}$  мають низьку чутливість до значення параметра  $\lambda_{\text{П}}$ , оскільки включають всі безпечні стани системи, і їх значення близькі до одиниці. По цій же причині при виборі значення  $\lambda_{\text{П}}$  немає потреби звертати увагу на аналіз значень  $K_{\text{БТИ}}$  і  $K_{\text{ФБ}}$ , оскільки для цих показників будуть забезпечені високі характеристики в дуже широкому діапазоні значень  $\lambda_{\text{П}}$ .

Дослідимо вплив коефіцієнта профілактики  $K_{\text{П}}$  на значення коефіцієнта технічного використання  $K_{\text{ТИ}}$ . Для цього за аналогією з дослідженням  $P_0(\lambda_{\text{П}}, K_{\text{П}})$  будемо розглядати  $K_{\text{ТИ}}(\lambda_{\text{П}}, K_{\text{П}})$  як функцію двох змінних. Значення  $\lambda_{\text{П}}$  змінюємо в діапазоні від 0,0001 до 0,0003 з кроком 0,00002, а значення  $K_{\text{П}}$  змінюємо від 0 до 1 з кроком 0,2 (рис. 7).

При збільшенні значення  $K_{\text{П}}$  збільшується значення  $K_{\text{ТИ}}$ , оскільки значення  $P_0$  збільшується за рахунок зменшення часу і ймовірності знаходження в стані профілактики. При збільшенні значення  $K_{\text{П}}$  значення максимуму  $K_{\text{ТИ}}$  зсувається в сторону збільшення  $\lambda_{\text{П}}$ .

## Висновок

В статті отримані марковські моделі готовності важливих для безпеки ІУС шляхом урахування помилок контролю і управління I, II і III роду, визначення безпечних, небезпечних і потенційно небезпечних станів систем нормальної експлуатації і систем безпеки, а також варіантів профілактичного технічного обслуговування, що дозволяє уточнити чисельні значення показників готовності і функціональної безпеки.

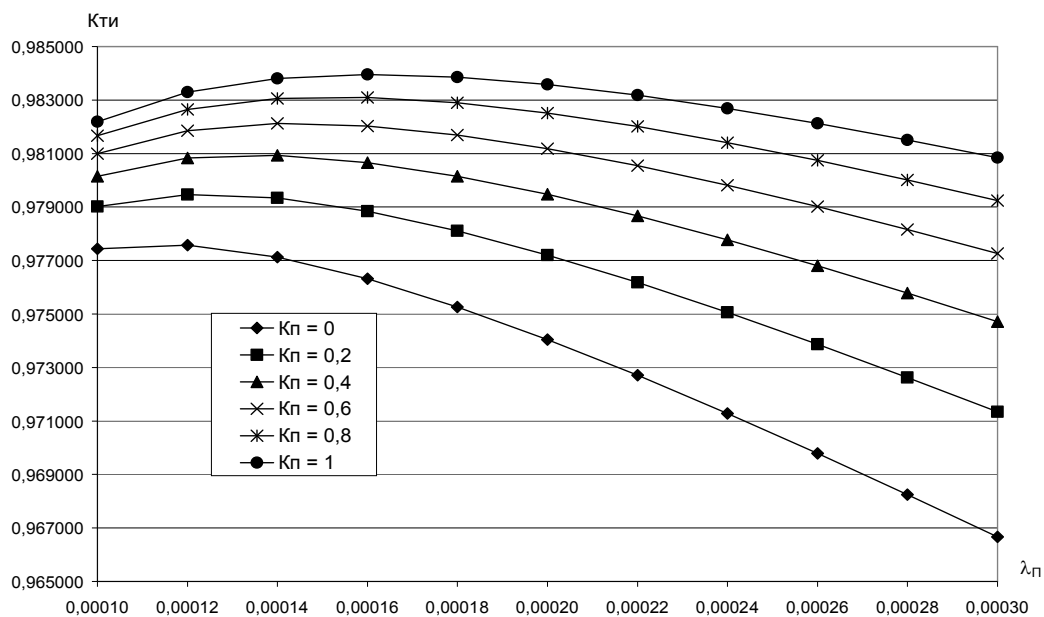


Рис. 7. Зависимости коэффициента технического использования от интенсивности профилактики при изменении значения коэффициента профилактики

Кроме ошибок контроля и управления I и II рода для ИУС также идентифицированы ошибки контроля и управления III рода, при которых правильно определяется тип (подмножество состояний), однако неправильно определяется состояние в рамках подмножества. Ошибки контроля и управления могут быть безопасными, потенциально опасными и опасными.

Для марковских моделей разработано два варианта учета состояния профилактического технического обслуживания. Помимо учета ПТО посредством единственного состояния, рассмотрен вариант, когда состояние профилактики расщеплено на две составляющие: состояние профилактики без устранения скрытых отказов и состояние профилактики с устранением скрытых отказов. Соотношение между интенсивностями перехода в различные состояния профилактики может быть учтено через коэффициент профилактики КП. Выполнено исследование систем алгебраических уравнений, описывающих стационарные модели состояний. Получены результаты моделирования для показателей готовности и безопасности.

## Список литературы

1. Ястребенецкий М.А. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами / М.А. Ястребенецкий. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
2. Технологии высокой готовности для программно-технических комплексов космических систем / В.С. Харченко и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2010. – 372 с.
3. Харченко В.С. Теоретические основы дефектоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью / В.С. Харченко. – Х.: ХВУ, 1996. – 506 с.
4. Скляр В.В. Анализ функциональной безопасности ИУС с использованием логических моделей ошибок контроля и управления / В.В. Скляр // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №. 7(48). – С. 267–271.
5. Энциклопедия безопасности авиации / Под ред. Н.С. Кулика. – М.: Техника, 2008. – 1000 с.

Поступила в редколлегию 17.03.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАРКІВСЬКИХ МОДЕЛЕЙ ІУС З УРАХУВАННЯМ ПОМИЛОК КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ

В.В. Скляр

У статті отримана та досліджена марківська модель інформаційно-управляючої системи (ІУС) з урахуванням роду і небезпеки помилок контролю та з урахуванням відмов засобів контролю. На підставі запропонованого підходу отримано клас моделей, що враховують різні типи помилок контролю та управління в ІУС, а також відмови засобів контролю та управління. Застосування моделей направлено на оцінювання надійності та функціональної безпеки ІУС.

**Ключові слова:** інформаційно-управляюча система, функціональна безпека, марківська модель.

## RESEARCH OF MARKOV MODELS OF I&C SYSTEMS WITH FAILURES OF MONITORING AND CONTROL

V.V. Sklyar

This paper describes and researches a Markov model of Instrumentation and Control (I&C) system taking into account types of hazardous control errors as well as failures of monitoring means. Based on the proposed approach obtained a class of models that take into account different types of failures in the control and monitoring of I&C systems. Application of models aimed at assessment of reliability and functional safety of I&C systems.

**Key words:** Instrumentation and Control system, functional safety, Markov model.