

УДК 656.61.052

## MATHEMATICAL MODEL FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF POLYERGATIC SYSTEM SAFETY DURING DYNAMIC POSITIONING

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОЛИЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ

**Gabruk R. A.**, *PhD, doctoral student*, **Tsymbal M. M.**, *DSc, professor*  
**Р. А. Габрук**, *к.т.н., докторант*, **Н. Н. Цымбал**, *д.т.н., профессор*

*National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine*  
*Національний університет «Одеська морська академія», Україна*

#### ABSTRACT

The mathematical model was formed for quantitative assessment of safety, which dedicated to the human component function of polyergatic system, during dynamic positioning and execution of technological work. The process of polyergatic system functioning was considered in the flow of disturbances by stationary Poisson events, which have different severity. The way to avoid the accidental outcome of potentially dangerous scenarios development is the analysis of disturb events flow, decision-making and implementation of decisions by a group of dynamic positioning system operators.

**Keywords:** Safety of navigation, mathematical model, polyergatic system, dynamic positioning system.

#### **Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами.**

Обеспечение энергетической независимости Украины обуславливает необходимость дальнейшего освоения углеводородных ресурсов континентального шельфа. Для эффективного решения данной задачи возникает необходимость использования систем динамического позиционирования (СДП). Что вызывает необходимость обеспечения безопасности не только процессов высокоточной навигации, происходящих в локально ограниченном пространстве, но и выполняемой технологической работы. Надежность и безопасность динамического позиционирования (ДП) обеспечивается применением человеко-машинных систем управления подвижным объектом водного транспорта (ПОВТ). Эффективное функционирование такой системы может быть рассмотрено следующим образом: адекватное надежное и точное функционирование технической

составляющей при осуществлении грамотного и надлежащего управления и контроля оператором системы динамического позиционирования (ОСДП). При своевременном и адекватном уходе, вероятность выхода из строя технической составляющей падает, выводя на передний план вопросы надежности человеческой составляющей в обеспечении безопасности ДП.

**Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.**

Проблематике человеческого фактора посвящено много публикаций отечественных и зарубежных ученых. Так в работе [1] на основании анализа аварийности указывается на необходимость совершенствования организации взаимодействия судоводителей. Приведена схема организации работы команды мостика при управлении движением. Вопросам влияния человеческого фактора на аварийность посвящена работа [2]. В ней рассматривается возможность нарушения функционирования комплекса «Вахтенный офицер-система управления».

В большинстве работ человек представлен как отдельный элемент без привязки к воздействующему на него изменяющемуся потоку событий, который формирует его ответные реакции. Единственным критерием выбирается навигационная безопасность без рассмотрения эффективности выполнения сопутствующих задач, что дает неполную картину. Таким образом, несмотря на предложенные подходы вопрос количественной оценки безопасности человеческой составляющей полиэргатической системы остается открытым.

**Формулирование целей статьи (постановка задачи).**

Целью статьи является разработка математической модели количественной оценки безопасности и эффективности функционирования человеческой составляющей полиэргатической системы при осуществлении ДП и выполнении технологической работы в локально ограниченном пространстве.

**Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов.**

Рассмотрим ОСДП, находящегося в потоке событий, который определяется как последовательность однородных событий, появляющихся одно за другим в случайные моменты времени. Рассматриваемый поток событий  $\Lambda$  является стационарным пуассоновским потоком. Стационарность рассматриваемого потока обуславливает его одинаковую интенсивность на всем рассматриваемом временном промежутке.

Во время первичной обработки событий выделяются важные события, которые вызывают необходимость дальнейшей обработки. Во время вторичной обработки события делятся ОСДП на категории важности. События I категории важности являются началом цепи причинно-взаимосвязанных событий, которые могут привести к навигационной аварии или аварии в контексте

выполнения технологической работы. События II категории важности не являются началом цепи причинно-взаимосвязанных событий, которые могут привести к аварии, но могут привести к снижению эффективности процесса ДП или выполнения технологической работы. События I категории имеют приоритет в обработке перед событиями II категории важности.

Состояния функционирования полиэргатической системы, состоящей из двух ОСДП и СДП, во время проведения технологических работ, связанных с ДП, можно охарактеризовать следующим образом:  $\Upsilon_{00}$  - важные события не произошли;  $\Upsilon_{10}$  - произошло одно событие I категории важности и не произошло ни одного события II категории важности;  $\Upsilon_{11}$  - произошло одно событие I категории важности и одно событие II категории важности;  $\Upsilon_{01}$  - не произошло ни одного события I категории важности, но произошло одно событие II категории важности;  $\Upsilon_{20}$  - произошло два события I категории важности и не произошло ни одного события II категории важности;  $\Upsilon_{02}$  - не произошло ни одного события I категории важности, но произошло два события II категории важности.

Находясь в потоке событий ОСДП анализируют его и реагируют соответствующим образом на произошедшие события. Реакции операторов на произошедшие события формируют поток реакций  $\mu$ . Под потоком реакций понимается поток ответных действий, производимых одно за другим одним непрерывно занятым ОСДП. Поток реакций имеет аналогичные потоку событий возмущений свойства.

Вводя условие отсутствия последействия, рассматриваемый процесс можно назвать марковским. Сформулированная выше четкая картина переходов из одного состояния в другое позволяет построить для конкретного марковского процесса размеченный граф состояний.

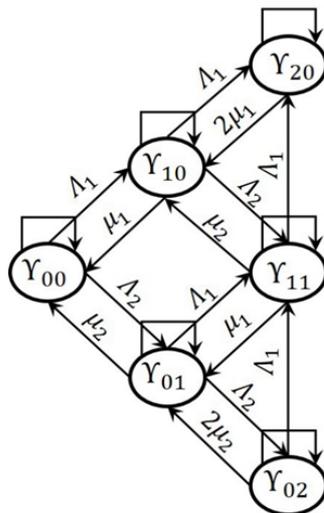


Рис. 1. Размеченный граф состояний функционирующей полиэргатической системы в состав которой входит 2 ОСДП

Составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\tilde{P}_{00}}{dt} = \mu_1\tilde{P}_{10} + \mu_2\tilde{P}_{01} - (\Lambda_1 + \Lambda_2)\tilde{P}_{00}, \\ \frac{d\tilde{P}_{10}}{dt} = \Lambda_1\tilde{P}_{00} + 2\mu_1\tilde{P}_{20} + \mu_2\tilde{P}_{11} - (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \mu_1)\tilde{P}_{10}, \\ \frac{d\tilde{P}_{20}}{dt} = \Lambda_1\tilde{P}_{10} + \Lambda_1\tilde{P}_{11} - 2\mu_1\tilde{P}_{20}, \\ \frac{d\tilde{P}_{01}}{dt} = \Lambda_2\tilde{P}_{00} + \mu_1\tilde{P}_{11} + 2\mu_2\tilde{P}_{02} - (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \mu_2)\tilde{P}_{01}, \\ \frac{d\tilde{P}_{11}}{dt} = \Lambda_2\tilde{P}_{10} + \Lambda_1\tilde{P}_{01} + \Lambda_1\tilde{P}_{02} - (\Lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)\tilde{P}_{11}, \\ \frac{d\tilde{P}_{02}}{dt} = \Lambda_2\tilde{P}_{01} - (\Lambda_1 + 2\mu_2)\tilde{P}_{02}, \\ \tilde{P}_{00} + \tilde{P}_{10} + \tilde{P}_{20} + \tilde{P}_{01} + \tilde{P}_{02} + \tilde{P}_{11} = 1, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\Lambda_1, \Lambda_2$  - интенсивности стационарных пуассоновских потоков событий I и II категории важности соответственно,  $\frac{1}{c}$ ;

$\mu_1, \mu_2$  - интенсивности потоков реакции на события I и II категории важности соответственно,  $\frac{1}{c}$ ;

$\tilde{P}_{00}, \tilde{P}_{10}, \tilde{P}_{20}, \tilde{P}_{01}, \tilde{P}_{02}, \tilde{P}_{11}$  - вероятность того, что полиэргатическая система  $Y$  в момент  $t$  находится соответственно в состоянии  $Y_{00}, Y_{10}, Y_{20}, Y_{01}, Y_{02}, Y_{11}$ .

Для нахождения финальных вероятностей эргодической системы (1), составленной на основании размеченного графа состояний марковского случайного процесса, перейдем от дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена к алгебраическим уравнениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\Lambda_1 + \Lambda_2)\tilde{P}_{00} = \mu_1\tilde{P}_{10} + \mu_2\tilde{P}_{01}, \\ (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \mu_1)\tilde{P}_{10} = \Lambda_1\tilde{P}_{00} + 2\mu_1\tilde{P}_{20} + \mu_2\tilde{P}_{11}, \\ 2\mu_1\tilde{P}_{20} = \Lambda_1\tilde{P}_{10} + \Lambda_1\tilde{P}_{11}, \\ (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \mu_2)\tilde{P}_{01} = \Lambda_2\tilde{P}_{00} + \mu_1\tilde{P}_{11} + 2\mu_2\tilde{P}_{02}, \\ (\Lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)\tilde{P}_{11} = \Lambda_2\tilde{P}_{10} + \Lambda_1\tilde{P}_{01} + \Lambda_1\tilde{P}_{02}, \\ (\Lambda_1 + 2\mu_2)\tilde{P}_{02} = \Lambda_2\tilde{P}_{01}, \\ \tilde{P}_{00} + \tilde{P}_{10} + \tilde{P}_{20} + \tilde{P}_{01} + \tilde{P}_{02} + \tilde{P}_{11} = 1. \end{array} \right. \quad (2)$$

Исходя из всех возможных детерминированных состояний полиэргатической системы, вероятности её пребывания в разных состояниях по отношению к возможным событиям I или II категорий выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} \tilde{P}_{BI} = \tilde{P}_{00} + \tilde{P}_{10} + \tilde{P}_{01} + \tilde{P}_{11} + \tilde{P}_{02}, \\ \tilde{P}_{BII} = \tilde{P}_{00} + \tilde{P}_{10} + \tilde{P}_{01}, \\ \tilde{P}_{AI} = \tilde{P}_{20}, \\ \tilde{P}_{AII} = \tilde{P}_{20} + \tilde{P}_{11} + \tilde{P}_{02}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\tilde{P}_{BI}, \tilde{P}_{BII}$  - вероятности безопасного функционирования полиэргатической системы по отношению к событиям I или II категории важности;

$\tilde{P}_{AI}, \tilde{P}_{AII}$  - вероятности возникновения опасности при функционировании полиэргатической системы по отношению к событиям I или II категории важности.

Окончательная искомая оценочная вероятность состояния безопасного функционирования без привязки к категориям событий выражается:

$$\begin{cases} \tilde{P}_B = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_1 + \Lambda_2} \tilde{P}_{BI} + \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2} \tilde{P}_{BII}, \\ \tilde{P}_A = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_1 + \Lambda_2} \tilde{P}_{AI} + \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2} \tilde{P}_{AII}, \\ \tilde{P}_B + \tilde{P}_A = 1. \end{cases} \quad (4)$$

где  $\tilde{P}_B$  - вероятность безопасного функционирования полиэргатической системы;

$\tilde{P}_A$  - вероятность возникновения опасности при функционировании полиэргатической системы.

Сформированная математическая модель оценки безопасности ПОВТ при выполнении им ДП и технологической работы в локально ограниченном пространстве программным образом реализована с помощью пакета Simulink, являющегося частью программного обеспечения Matlab. Структура алгоритма представлена на рис. 2.

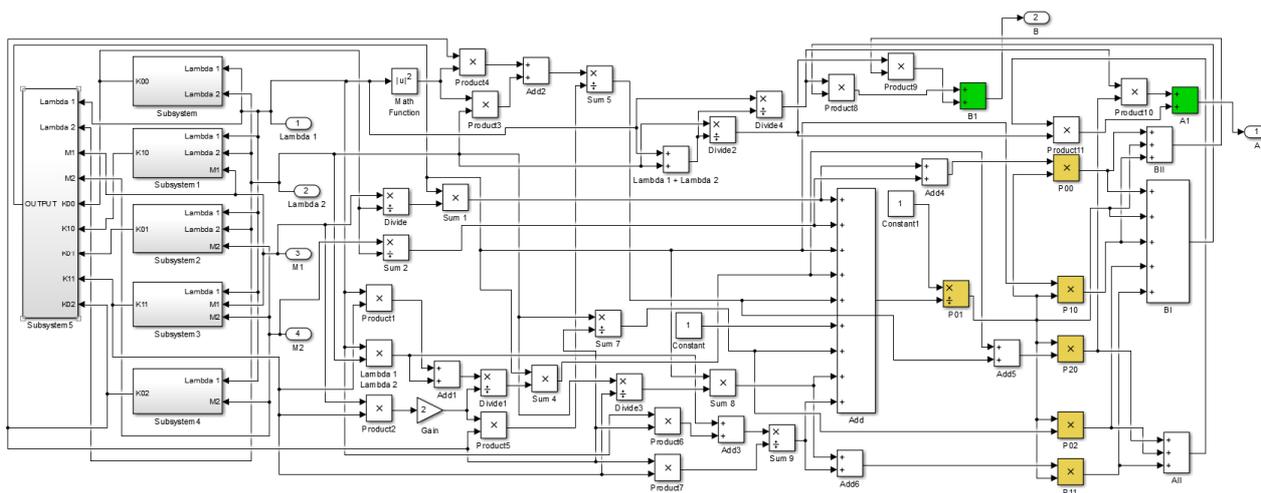


Рис. 2. Структура алгоритма расчета безопасности ПОВТ, реализованная в среде программирования Matlab

Входными параметрами являются величины, характеризующие потоки событий и реакций. Таким образом, на основании (1) - (4) происходит окончательный расчёт безопасности функционирования полиэргатической системы, состоящей из 2 ОСДП. Если вероятность безопасного функционирования системы не является достоверной, то ОСДП принимает корректирующие действия, вызывая капитана, который также выполняет функции ОСДП и принимает на себя командование ПОВТ или прекращает операции, связанные с ДП и производством технологической работы, выводя тем самым ПОВТ из потенциально опасного состояния.

### Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению.

Предложенная математическая модель позволяет количественно оценить безопасность и эффективность ДП и выполнения технологической работы. Предложенная модель впервые рассматривает совместную работу ОСДП при выполнении не только задач ДП, но и обеспечении технологической работы.

Модель содержит основное, головное, событие, называемое фокусом, которое интерпретируется как безаварийная ситуация. Однако необходимо отметить, что в системах (3,4) также присутствуют и вероятности возникновения опасности, которые могут быть использованы для дальнейшего исследования работы полиэргатической системы в условиях близких у аварийным. Перспективой по данному направлению может являться уточнение оценок потоков событий и потоков реакций в зависимости от выполняемых работ и состояния ОСДП.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. - 208 с.

2. Топалов В.П. Анализ способов предотвращения аварий судов / В.П. Топалов, А.А. Кобыляцкий, Л.А. Позолотин // Судовождение: Сб. научн. трудов/ ОНМА.- Одесса: «ИздатИнформ», 2007.- Вып. 16. – С. 166-175.
3. IMCA M 117 The Training and experience of Key DP Personnel.- IMCA, London, 2006.- 42 p.