

# **Компьютерная имитационная модель процесса функционирования малогабаритных разведывательных беспилотных летательных аппаратов с учетом возможного радиоэлектронного противодействия**

Р. Г. Хильченко, e-mail: hrg-1984@yandex.ru  
С. Р. Неугомонов, e-mail: notice.1902@mail.ru

ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
(г. Воронеж)

***Аннотация.** В среде MATLAB Simulink разработана компьютерная имитационная модель процесса функционирования малогабаритных разведывательных беспилотных летательных аппаратов при выполнении ими разведывательных задач. Представленная Марковским случайным процессом, модель позволяет оперативно изменять исходные данные и наглядно отображать результаты оценки эффективности разведки в виде вероятностно-временных зависимостей.*

***Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, Марковский случайный процесс, имитационная модель, оценка эффективности, радиоэлектронное противодействие.*

## **Введение**

Анализ малогабаритных коммерческих беспилотных летательных аппаратов (МК БЛА) типа «квадрокоптер» [1], а также опыт последних вооруженных конфликтов подтвердили возможность их применения нерегулярными воинскими формированиями. Основной задачей, возложенной на такие БЛА, является ведение разведки для выдачи целеуказаний огневым средствам как наземного, так и воздушного базирования. Другая, не менее важная, задача – воздушный контроль эффективности стрельбы (огневого удара) с борта БЛА может существенно повысить вероятность поражения защищаемого объекта. В этих условиях актуальным следует считать детальное исследование процесса функционирования МК БЛА, выполняющих информационные задачи. Важным аспектом такого исследования должна стать оценка возможности срыва процесса добывания разведанных средствами радиоэлектронного поражения.

Цель статьи состоит в разработке компьютерной имитационной модели процесса функционирования разведывательного МК БЛА,

учитывающей радиоэлектронное противодействие со стороны противоборствующих сил.

### 1. Процесса функционирования БЛА

Процесс функционирования МК БЛА при выполнении им разведывательной задачи (РЗ) с учетом радиоэлектронного воздействия представим в виде графа состояний, показанного на рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

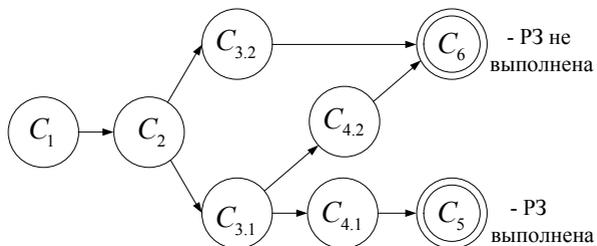


Рис. 1. Процесс функционирования МК БЛА при выполнении им задач разведки с учетом радиоэлектронного противодействия

Данный граф является динамической моделью упомянутого процесса и характеризуется следующими состояниями:  $C_1$  – исходное состояние, в котором БЛА находится возле оператора в готовности к взлету и выполнению поставленной задачи;  $C_2$  – БЛА взлетел и занял высоту, оператором зафиксировано устойчивое управление БЛА;  $C_3$  – выход БЛА в район выполнения боевой задачи – достигнута точка начала маршрута патрулирования, из которой квадрокоптер переходит к поиску целей (начало непосредственного ведения разведки);  $C_{3.2}, C_{4.2}$  – срыв управления с прекращением выполнения разведывательной задачи БЛА;  $C_{3.1}, C_{4.1}$  – срыв управления без прекращения выполнения разведывательной задачи БЛА;  $C_5$  – поглощающее состояние – РЗ выполнена, объект разведки вскрыт, БЛА возвратился к месту взлета и успешно осуществил посадку;  $C_6$  – поглощающее состояние, которое объединяет состояния  $C_{3.2}$  и  $C_{4.2}$ , характеризуя прекращение выполнения РЗ.

Таким образом, выделены два этапа ( $C_3$  и  $C_4$ ) возможного вмешательства в процесс функционирования БЛА с целью срыва выполнения задачи посредством радиоэлектронного противодействия. При этом эффект противодействия может состоять в затягивании

(замедлении) процесса функционирования БЛА ( $C_{3.1}, C_{4.1}$ ) без его прекращения и в безвозвратном срыве управления ( $C_{3.2}, C_{4.2}$ ).

В первом случае при ограниченном времени выполнения РЗ затягивание момента прибытия БЛА в район поиска и сокращение времени на обнаружение цели в конечном итоге влияет на эффективность ведения разведки. Данный вариант возможен вследствие радиоэлектронного воздействия, эффективности которого оказалось недостаточно для срыва управления полетом. Во втором случае в результате успешного (эффективного) воздействия средствами радиоэлектронного поражения БЛА прекращает функционировать, поэтому РЗ считается не выполненной.

В итоге, исходя из рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, можно выделить три ветви возможного протекания рассматриваемого процесса:

1)  $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_{3.1} \rightarrow C_{4.1} \rightarrow C_5$  – процесс завершается выполнением РЗ возможно с меньшим качеством за счет радиоэлектронного воздействия на двух этапах полета;

2)  $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_{3.1} \rightarrow C_{4.2} \rightarrow C_6$  – процесс завершается срывом выполнения РЗ за счет успешного радиоэлектронного воздействия в районе выполнения задачи и недостаточно эффективным воздействием на этапе подлета;

3)  $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_{3.2} \rightarrow C_6$  – процесс завершается срывом выполнения РЗ за счет успешного радиоэлектронного воздействия на этапе подлета к району выполнения задачи.

## 2. Методический аппарат моделирования

Динамика процесса функционирования БЛА, представленная переходами между состояниями, будет характеризоваться вероятностями  $P_{ij}$  перехода из  $i$ -го состояния в  $j$ -ое и плотностью вероятности  $\varphi_{ij}(t)$  времени задержки процесса в  $i$ -ом состоянии перед тем, как перейти в  $j$ -ое. Следовательно, проиллюстрированный на рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** процесс функционирования БЛА будет представлять собой полумарковский случайный процесс. Если все  $\varphi_{ij}(t) = 0$  при  $t < 1$  и  $\varphi_{ij}(t) = 1$  при  $t > 1$  (переходы происходят через каждую единицу времени), то полумарковский процесс преобразуется в Марковскую цепь с дискретным временем. Если же  $\varphi_{ij}(t)$  экспоненциальные, то полумарковский преобразуется в Марковский процесс с непрерывным временем.

Используя подход, описанный в [2], каждый переход графа состояний представим передаточной функцией  $H_{ij}(s)$  в виде произведения вероятности перехода « $i \rightarrow j$ » на плотность вероятности времени задержки в форме преобразования Лапласа:

$$H_{ij}(s) = L_s \{ P_{ij} \cdot \varphi_{ij}(t) \} = P_{ij} \cdot \varphi_{ij}(s), \quad (1)$$

где  $L_s \{ \dots \}$  – символ преобразования Лапласа;  $s$  – оператор Лапласа.

Для того чтобы записать общую передаточную функцию  $H_{16}(s)$  процесса функционирования БЛА для неуспешного выполнения РЗ (переход системы из состояния  $C_1$  в состояние  $C_6$ ), учитывая выражение (1) и правила преобразования передаточных функций, запишем:

$$H_{16}(s) = H_{12}(s) [ H_{23.2}(s)H_{3.2.6}(s) + H_{23.1}(s)H_{3.1.4.2}(s)H_{4.2.6}(s) ]. \quad (2)$$

По аналогии запишем передаточную функцию процесса успешного выполнения разведывательной задачи МК БЛА:

$$H_{15}(s) = H_{12}(s)H_{23.1}(s)H_{3.1.4.1}(s)H_{4.1.5}(s). \quad (3)$$

Таким образом, записанные в выражениях (3) и (4) общие передаточные функции – это математические модели неуспешного и успешного соответственно процессов функционирования БЛА при выполнении РЗ.

Далее, получив общую передаточную функцию, перейдем в выражении для срыва разведывательной задачи БЛА (6) от изображения к оригиналу и получим функцию распределения времени функционирования процесса:

$$H_{16}(t) = L_s^{-1} \{ 1/s \cdot H_{16}(s) \}, \quad (4)$$

где  $L_s^{-1} \{ \dots \}$  – символ обратного преобразования Лапласа;  $1/s$  – интегратор, при помощи которого можно перейти от плотности вероятности к функции распределения.

Функция распределения (4) представляет собой вероятностно-временную зависимость процесса функционирования БЛА от времени [3]:

$$P_{PЗ}^{БЛА}(t) \equiv H_{16}(t). \quad (5)$$

Данный процесс функционирования БЛА будем считать Марковским, время переходов которого подчиняется экспоненциальному закону:

$$\varphi_{ij}(t) = 1/\bar{T}_{ij} \cdot \exp\{-1/\bar{T}_{ij} \cdot t\}, \quad (6)$$

где  $\bar{T}_{ij}$  – среднее время, необходимое на переход из одного состояния в другое.

### 3. Компьютерное моделирование

Для построения компьютерной модели рассматриваемого процесса воспользуемся программным пакетом имитационного моделирования Simulink в системе MATLAB.

Пакет расширения Simulink служит для имитационного моделирования систем, состоящих из графических блоков с заданными свойствами (параметрами). В состав моделей могут включаться источники сигналов различного вида, виртуальные регистрирующие приборы, графические средства анимации существующих и новых элементов системы. Simulink автоматизирует наиболее трудоемкий этап моделирования – решение сложных систем алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную модель, обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль за поведением созданного пользователем виртуального устройства (процесса).

На рис. 2 показана компьютерная имитационная модель процесса функционирования МК БЛА, выполненная в среде разработки MATLAB Simulink на основе описанного выше методического аппарата.

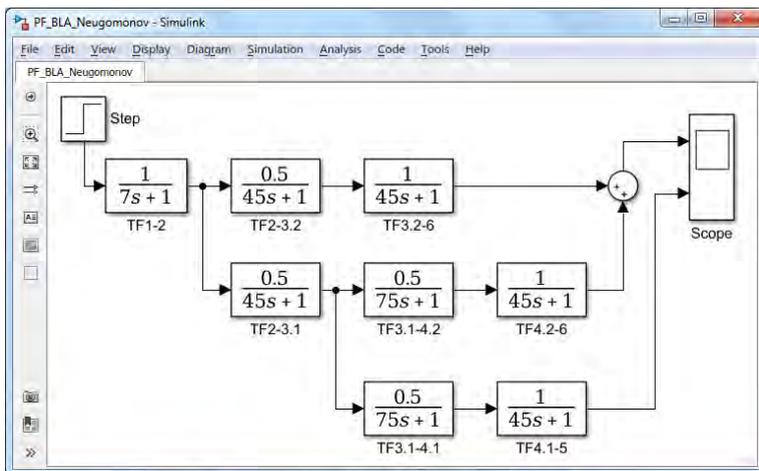


Рис. 2. Компьютерная имитационная модель процесса функционирования МК БЛА, выполненная в среде разработки MATLAB Simulink

Представленная модель описывает переходы между состояниями графа (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) с помощью передаточных функций. Она позволяет определить временные и вероятностные характеристики процесса функционирования разведывательного БЛА, а также оценить воздействие «внешних сил» на результат выполнения задачи. Опишем используемые в модели блоки.

Блок «Step» имитирует генератор формирования ступенчатого сигнала. На рис. 3 показано окно основных параметров сигнала на выходе «Step». Среди которых:

- Step time – время появления перепада (скачка);
- Initial value – начальное значение сигнала;
- Final value – конечное значение сигнала;
- Sample time – эталонное время.

Значения этих параметров и вид формируемого сигнала во времени также представлены на рис. 3.

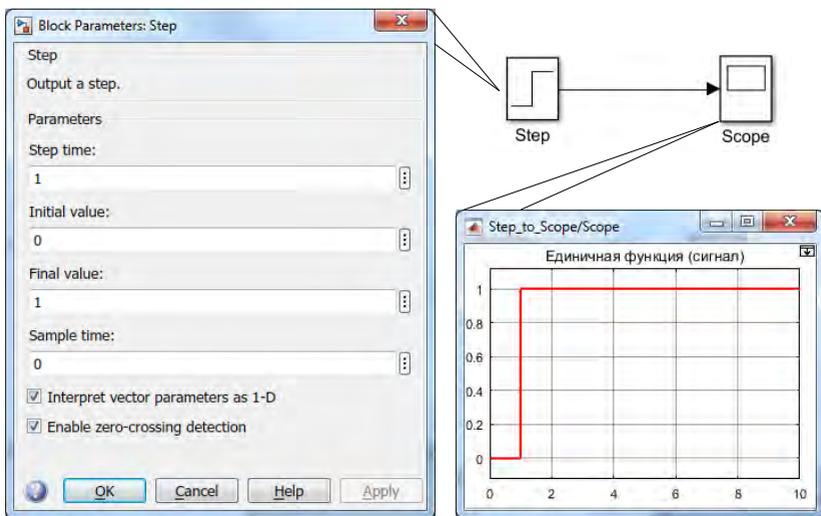


Рис. 3. Окно основных параметров и вид формируемого сигнала на выходе «Step»

Блок «TF» (Transfer Fcn) представляет собой реализацию передаточной функции (1), временная составляющая которой распределена по экспоненциальному закону (5). На рис. 4 показано окно настройки блока «Transfer Fcn» первой передаточной функции ( $TF_{1-2}$  или  $H_{12}(t)$ ). Его основными параметрами являются:

- Numerator – коэффициенты полинома числителя;
- Denominator – коэффициенты полинома знаменателя;
- Absolute tolerance – абсолютная погрешность.

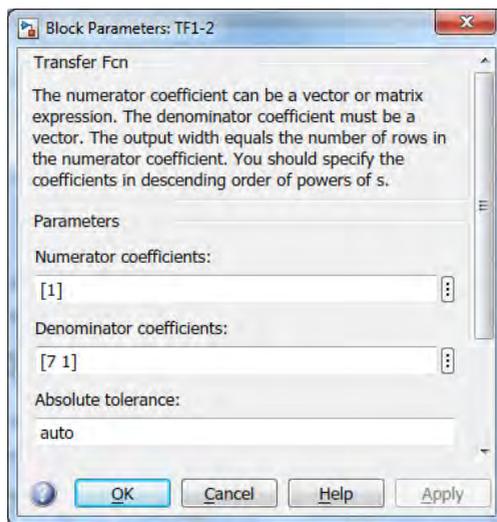


Рис. 4. Окно настройки параметров блока «Transfer Fcn»

Блок используется для моделирования линейных звеньев передаточной цепи. Для его создания необходимо ввести значения коэффициентов в строки Numerator и Denominator, соответствующие числителю и знаменателю. В нашем случае значение числителя заданному значению вероятности перехода  $P_{ij}$  и не может превышать единицы.

Блок «Scope» используется для построения временных зависимостей и имеет возможность отображать несколько графиков на одной временной оси.

Блок «Sum» вычисляет сумму текущих значений сигналов, поступающих на его входы. Основными параметрами «Sum» являются:

- Icon shape – форма блока (round – окружность, rectangular – прямоугольник);

- list of sign – список знаков («+» - плюс, «-» - минус и «|» - разделитель знаков).

- Saturate on integer overflow (флажок) – подавлять переполнение целого. При установленном флажке ограничение сигналов целого типа выполняется корректно.

Количество входов «Sum» определяется списком знаков, вписанных в list of sign, при этом метки входов обозначаются соответствующими знаками через разделитель.

#### 4. Результаты моделирования

Для имитации рассматриваемого процесса необходимы исходные данные в виде значений вероятности переходов  $P_{ij}$  и среднего времени  $\bar{T}_{ij}$ , описывающего экспоненциальный закон распределения (5). В качестве таковых данных будем использовать:  $P_{12} = 1, \bar{T}_{12} = 7 c$  (блок TF1-2);  $P_{23.1} = 0.5, \bar{T}_{23.1} = 45 c$  (блок TF2-3.1);  $P_{23.2} = 0.5, \bar{T}_{23.2} = 45 c$  (блок TF2-3.2);  $P_{3.14.1} = 0.5, \bar{T}_{3.14.1} = 75 c$  (блок TF3.1-4.1);  $P_{3.14.2} = 0.5, \bar{T}_{3.14.2} = 75 c$  (блок TF3.1-4.2);  $P_{4.15} = 1, \bar{T}_{4.15} = 45 c$  (блок TF4.1-5);  $P_{4.26} = 1, \bar{T}_{4.26} = 45 c$  (блок TF4.2-6).

В результате имитационного моделирования блок «Скор» формирует две зависимости, соответствующие обратному преобразованию Лапласа выражений (2) и (3), вид которых представлен на рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

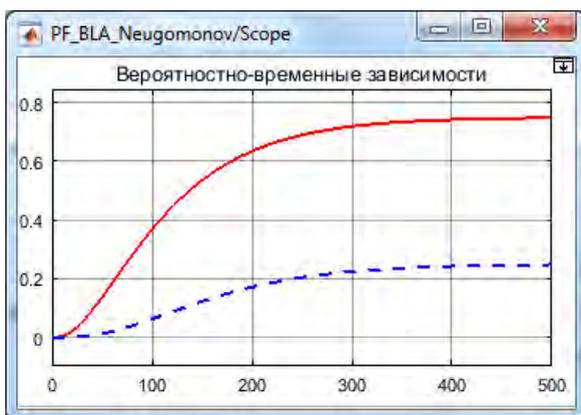


Рис. 5. Вероятностно-временные зависимости процессов выполнения и невыполнения БЛА поставленной задачи

Поскольку блок «Скор» работает с функциями времени, процедура обратного преобразования Лапласа с учетом интегрирования (4) выполняется автоматически.

Пунктирной линией на данном рисунке показана временная зависимость вероятности выполнения  $H_{15}(t)$ , а сплошной – невыполнения  $H_{16}(t)$  МК БЛА разведывательной задачи. Адекватность полученных зависимостей и предложенного методического аппарата

может быть обоснована выполнением нормировочного условия  $H_{15}(t \rightarrow \infty) + H_{16}(t \rightarrow \infty) = 1$ .

### **Заключение**

Таким образом, разработанная в статье компьютерная имитационная модель позволяет описать процесс функционирования МК БЛА при выполнении и невыполнении им разведывательной задачи. Модель представляет собой набор блоков передаточных функций, описывающих переходные процессы смены физических и информационных состояний, в которых пребывает разведывательный БЛА. Модель способна оперативно изменять исходные данные, наглядно отображать результаты оценки эффективности как самой разведки, так и противодействия ей внешними силами.

### **Список литературы**

1. Хильченко, Р.Г. Анализ возможности применения коммерческих беспилотных летательных аппаратов нерегулярными воинскими формированиями / Р.Г. Хильченко, С.Р. Неугомонов // Радиоэлектронная борьба и информационная безопасность: сб. тр. участников VII Межвузовской научно-практической конф. курсантов и слушателей «Молодежные чтения, посвященные памяти Ю.А. Гагарина». (Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 16 мая 2020 г.). – Воронеж, 2020. – С. 234-239.
2. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения / Ю.Л. Козирацкий [и др.]; отв. ред. Ю.Л. Козирацкий – М.: Радиотехника, 2013. – 232 с.
3. Хильченко, Р.Г. Математическая модель процесса функционирования малогабаритных коммерческих беспилотных летательных аппаратов при выполнении разведывательной задачи с учетом возможного радиоэлектронного воздействия / Р.Г. Хильченко, С.Р. Неугомонов // Радиоэлектронные контрольные и измерительные системы: сб. тр. участников IX междунар. научно-технической конф. «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией». (Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 15 октября 2020 г.). – Воронеж, 2020. – С. 142-145.