

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ АПС-РМПГ СРЕДСТВАМИ ПАКЕТА MATLAB SIMULINK+ STATEFLOW

Муха А.А.

Институт проблем математических машин и систем  
Национальной академии наук Украины

Статья посвящена проблеме имитационного моделирования алгоритма работы гарантированной системы для обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах. Приводятся результаты моделирования средствами пакета Matlab Simulink+Stateflow алгоритма функционирования электронной гарантированной системы автоматической переездной сигнализации нового поколения с возможностью сигнализации о занятости переезда на путевой железнодорожный светофор и в кабину машиниста.

**Ключевые слова:** отказоустойчивость, гарантированная система, имитационное моделирование.

**Вступление.** На этапе разработки, важным пунктом синтеза системы является ее моделирование. На сегодняшнее время благодаря, наличию высокотехнической ресурсной базы, стали широкодоступными визуально-логические методы моделирования сложных структур, логика работы которых, изменяема во времени. Одной из таких методик, является имитационное моделирование системы с использованием математического аппарата **Matlab Simulink +Stateflow**. Основным достижением этого аппарата моделирования, является то, что он обеспечивает повышенную степень наглядности работы модели благодаря использованию анимации, отображающей изменения в системе, сопровождающиеся переходами от одного состояния к другому при выполнении заданных характеристик функционирования.

Целью работы, является синтез отказоустойчивого алгоритма функционирования АПС-ЭГ нового поколения, возможностью сигнализации о занятости переезда на путевой железнодорожный светофор и в кабину машиниста.

Для достижения поставленной цели, в рамках проекта по созданию АПС-РМПГ [1] (автоматическая переездная сигнализация радиомикропроцессорная, гарантированная) были проведены работы по созданию алгоритма функционирования и подтверждению его работоспособности. С этой целью было поведено описание алгоритма работы системы и моделирование ее функционирования в среде Matlab Simulink+Stateflow, на основе которого сгенерирован код для программируемых логических контроллеров (PLC).

### 2. Структурные особенности системы и регламент работы АПС-РМПГ

Рассмотрим структурную схему технических средств, входящих в систему АПС-РМПГ Рис. 1.

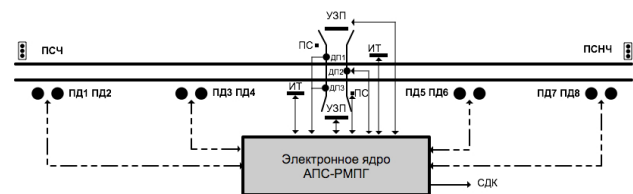


Рис. 1. Структурная схема АПС-РМПГ (упрощенная, без учета радиомодулей)

Нами используются следующие условные обозначения:

**УЗП** – устройства заграждения переезда

**ПС** – переездные светофоры;

**ДП1, ДП2, ДП3** – датчики перемещения;  
**ПД1, ПД2, ПД3, ПД4, ПД5, ПД6, ПД7, ПД8** – чувствительные датчики счета осей;  
**ПСЧ** – проходной светофор системы автоблокировки четного направления;  
**ПСН** – проходной светофор системы автоблокировки нечетного направления;  
**ЗС** – звуковой сигнал серены;  
**ИТ** – информационное табло;  
**СДК** – система диспетчерского контроля;  
**ПЕ** – подвижная единица;  
**АТС** – автотранспортное средство.

Алгоритм работы АПС-РМПГ составлен с учетом действующих стандартов и регламента функционирования, а именно инструкции по оборудованию и эксплуатации железнодорожных переездов, утвержденной Минтрансвязи от 26.01.2007 № 54. [2]

Согласно данным требованиям, определяются время извещения о приближении ПЕ к переезду (для оповестительной сигнализации с электрошлагбаумами – 40 с.), длины участков приближения рассчитываются исходя из соответствующего времени извещения, скорости АТС на переезде (8 км/ч) максимальной длины АТС (24 м) и максимальной скорости поезда на участке (120-140 км/ч).

Для безопасного функционирования и выполнения поставленных условий и устойчивости системы к отказам в структуре системы используется 8 ПД размещенных на участке переезда симметрично, относительно пересечения полосы движения ТС Рис. 2.

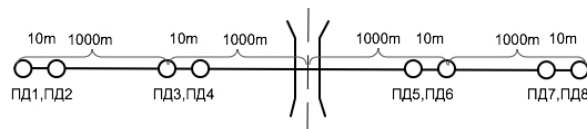


Рис. 2. Схема размещения ПД на участке переезда

Как видно из схемы датчики размещены парно, что обеспечивает их дублирование в случае отказа одного из них. Смещение ПД1 относительно ПД2 составляет 10 м. – такое расположение позволяет определить скорость ПЕ уже на этапе вхождения его на участок переезда и заранее оптимизировать время закрытия комплекса УЗП. Согласно приведенной схеме Датчики ПД1, ПД2 и ПД7, ПД8 отвечают за формирование сигнала открытия переезда и включения ПС, ПСЧ, ПСН, определение количества осей ПЕ на участке, скорости вхождения ПЕ на участок. Датчики ПД3, ПД4 и ПД5, ПД6 – используются для оптимизации времени открытия / закрытия переезда, оптимизации включения/выключения ПС, ПСЧ, ПСН, а в

случае по-парных отказов ПС1, ПС2 и ПС7, ПС8 выполняют их функции с целью обеспечения условий безопасности.

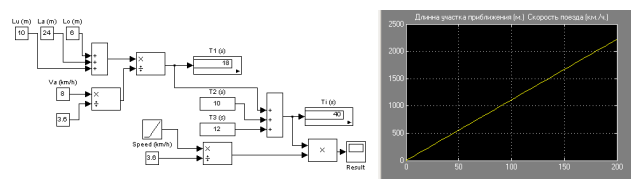
Система АПС-РМПГ предусматривает использование в качестве ПД, многофункциональных датчиков с частотно-модулированным выходным сигналом и схемой обработки для дальнейшего использования в цифровых системах [3], имеет 3 выхода, вых.1 – направление движения ПЕ инвертированный, вых.2 – импульсный 0/1 (количество осей ПЕ), вых.3- сигнал нарушения работы ПД 0/1.

**2.1. Безопасная длина участков приближения**

Расчет границ длинны участков приближения в зависимости от времени извещения рассчитывался согласно требованиям [2] и исходя из следующих соображений:

$L_p = (V_{max} * T_i) / 3.6$ (1)	$V_{max}$ – максимальная скорость движения поездов на участке переезда (км/ч); 3.6 – коэффициент перевода скорости из км/ч в м/с;
$T_i = T_1 + T_2 + T_3$ (2)	$T_1$ – время извещения о приближении поезда к переезду; $T_2$ – время срабатывания переездной сигнализации (с); $T_3$ – гарантийное время (с);
$T_1 = (L_u + L_a + L_o) / V_a$ (3)	$T_1$ – время за которое АТС проедет переезд (с) и определяется по формуле (3); $V_a$ – скорость АТС на переезде; $L_u$ – длина участка переезда (м); $L_a$ – длина АТС (м); $L_o$ – расстояние АТС до УЗП (м).

На основе полученных формул составлена модель вычислений Рис. 3. и получена зависимость длины участка приближения от скорости движения поезда с учетом требований к времени извещения.



**Рис. 3. Вычисление зависимости длины участка приближения от скорости движения поезда**

Значения  $T_1, T_i$ , занесены в модель Рис. 4. для обеспечения задержки закрытия КУЗП и задержки включения ПС1/ПС2 .

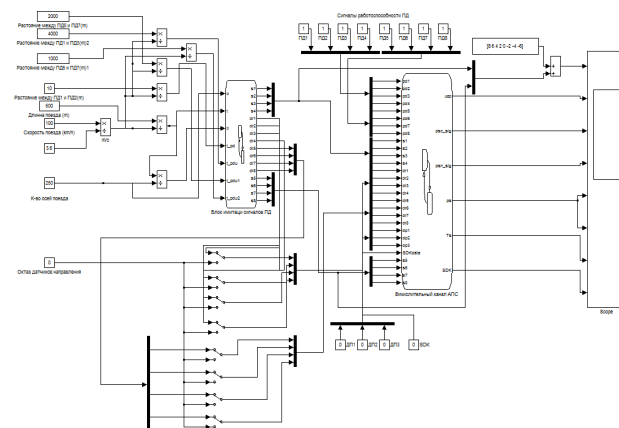
Выбор длины участков указаны на Рис. 2 и также занесены в модель Рис. 4

Согласно расчетной длине участков максимальная скорость ПЕ составляет 140 км/ч, за это время система обеспечивает формирование сигнала закрытия с учетом допустимого времени извещения в  $T_i=40$  сек.

**3. Описание процесса моделирования и алгоритма работы АПС**

Моделирование осуществлялось посредством описания блока «Вычислительный канал АПС» Рис. 4. состояний и действий системы в процессе ее нормально функционирования и работы при отказах ПД. Также была создана модель генерации сигналов ПД «Блок имитации сигналов ПД» Рис. 4. с учетом их размещения на участке переезда, которая

обеспечила имитирование работы ПД для ввода их сигналов в систему АПС РМПГ.



**Рис. 4. Имитационная модель алгоритма функционирования АПС РМПГ**

При моделировании учитывались:

1. Структурные особенности системы: количество и расположение ПД, ПС, УЗП, ДП, ИТ.
2. Безопасная длина участков приближения
3. Параметры ПЕ: скорость, длина, количество осей, характер движения (с остановкой, без остановки, остановка и движение в обратном направлении)
4. Требования к безопасному времени извещения и закрытия переезда.
5. Регламент работы АПС
6. Требования отказоустойчивости и гарантоспособности системы

Для имитации воздействий на систему, в модель были занесены исходные параметры ПЕ: скорость, длина, количество осей, характер движения (с остановкой, без остановки, остановка и движение в обратном направлении)

Логика блока «Вычислительный канал АПС» Рис. 5. включает состояния:

- Идентификации сигналов ПД и их маскирования в случае их отказа или сбоя Identify;
- Отслеживания активности ПД и счета осей Normal, Normal1;
- Определения местонахождения ПЕ на участке переезда Logic, Logic1;
- Вычисления скорости Speed;
- Закрытия УЗП UZP;
- Функционирования ПС, ЗС (PS\_Alarm), ПСЧ(PSCH), ПСНЧ(PSN);
- Отслеживания зоны переезда ДП (MOTION);
- Отправки сигналов в канал СДК (SDK).

В процессе моделирования разработана соответствующая логика работы системы Рис. 5, которая согласно входящим данным отслеживает:

- вхождение ПЕ на участок переезда, учитывая сигналы ПД;
- счет количества осей ПЕ во время его прохождения по участку переезда;
- скорость ПЕ при вхождении на участок переезда;
- в постоянном режиме отслеживаются сигналы ПД об их рабочем состоянии.

Построенная модель позволила произвести отладку алгоритма функционирования системы, при движении ПЕ в четном и нечетном направлениях, а также с аварийной остановкой в зоне переезда и движением в обратном направлении. Было проверено выполнение условий гарантоспособности и реакции системы на разнотипные отказы ПД, сбоя счета осей и ошибки определения направления.

Таблица 1  
Рабочие состояния системы при отказах ПД1,2,7,8

	ПД1	ПД2	ПД7	ПД8
1	0	1	1	1
2	1	0	1	1
3	1	1	0	1
4	1	1	1	0
5	0	1	1	0
6	1	0	0	1
7	0	1	1	0

Описание логики работы АПС в виде состояний

системы позволило контролироваться отказы ПД. Состояния системы при которых выполняются требуемые [2] условия и система остается рабочем состоянии Таб.1. 0 – отказ ПД или сбой счета осей или определения направления.

В случае отказов ПД3,4,5,6 Таб.2. система остается в рабочем состоянии. В случае возникновения отказов ПД1,2,7,8 оптимизация времени закрытия перезда и предупредительных сигналов, согласно скорости ПЕ прекращается. При возникновении большего числа отказов ПД1,2,7,8 чем указано в Таб.1, в система теряет возможность поддержания параметра безопасного времени закрытия  $T_i$ .

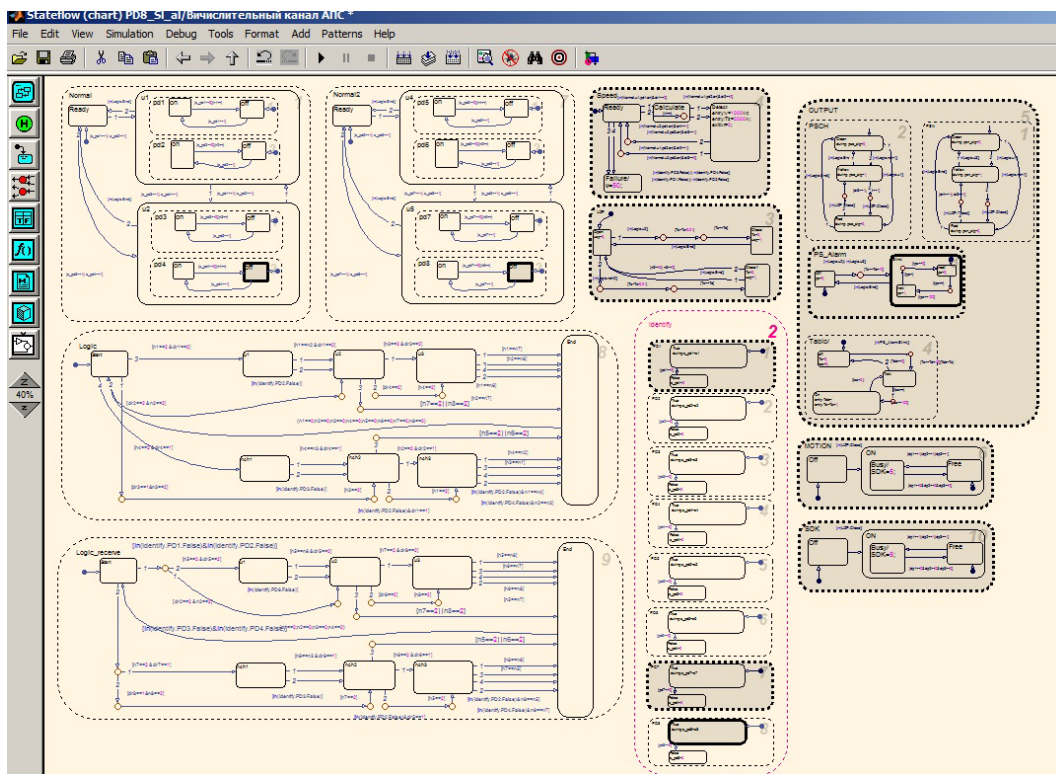


Рис. 5. Блок логики АПС (Диаграмма Stateflow)

4. Результаты моделирования работы АПС-ЭГ

Таблица 2.  
Рабочие состояния системы при отказах ПД3,4,5,6

	ПД3	ПД4	ПД5	ПД6
1	0	1	1	1
2	1	0	1	1
3	1	1	0	1
4	1	1	1	0
5	0	1	1	0
6	1	0	0	1
7	0	1	1	0

В процессе моделирования выработан отказоустойчивый, гарантоспособный алгоритм который обеспечивает проезд по участку перезда ПЕ:

- в четном и нечетном направлениях, а также с аварийной остановкой в зоне перезда и его движением в обратном направлении;
- максимальной длиной 1900 м;
- минимальным количеством осей ПЕ 2 шт.;
- максимальной скоростью ПЕ 140 км/ч;
- при одновременных отказах нескольких ПД.

На временной диаграмме Рис. 6. приведены сигналы счета осей ПД для случая прохождения ПЕ в четном направлении. Как видно из графика сигналы поступают в вычислительный канал согласно временным интервалам, которые отвечают заданным параметрам скорости ПЕ 100 км/ч, длины ПЕ 500 м. На 5 секунде ПЕ вступает на участок перезда (Сигнал с ПД1) на 167 секунде ПЕ покидает пределы участка перезда. Проверить соответствие возможно производя расчет прохождения участка длиной в  $4000\text{ м} + 500\text{ м}$  (длина ПЕ) разделив на его скорость.  $\frac{4000\text{ м} + 500\text{ м}}{100\text{ км/ч} \div 3.6} \approx 167\text{ с}$ . Аналогичным образом возможно убедиться в своевременности подачи остальных сигналов Рис. 6, Рис. 7.

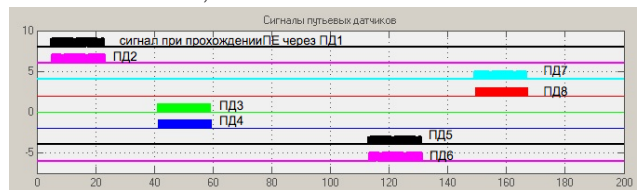


Рис. 6. Временная диаграмма сигналов ПД (Скорость ПЕ 100 км/ч, длина 500 м.)



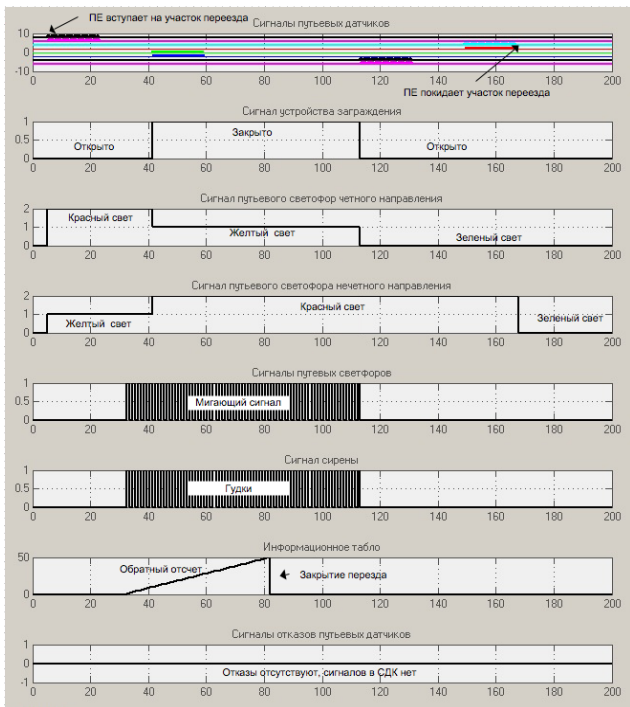


Рис. 7. Временная диаграмма сигналов на выходе АПС-РМПГ, четное направление (скорость ПЕ 100 км/ч, длина 500 м. с пояснениями)

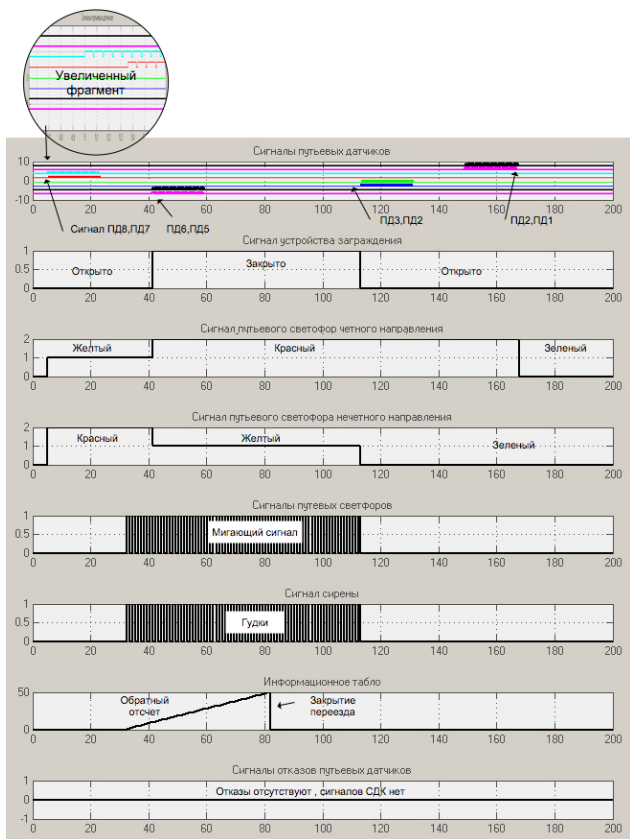


Рис. 8. Временная диаграмма сигналов на выходе АПС-РМПГ, нечетное направление (скорость ПЕ 100 км/ч, длина 500 м. с пояснениями)

Временная диаграмма сигналов на выходе АПС Рис. 7. отображают регламентное нормальное поведение системы при котором обеспечивается своевременное безопасное и оптимальное закрытие УЗП и включение оповестительных сигналов.

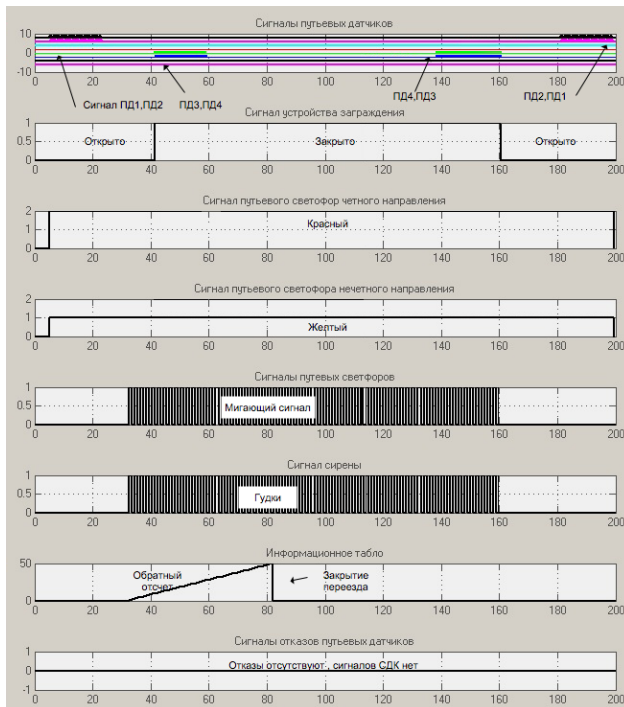


Рис. 9. Временная диаграмма сигналов на выходе АПС-РМПГ, четное направление, остановка на участке переезда, следование в обратном направлении (ПЕ 100 км/ч, длина 500 м. с пояснениями)

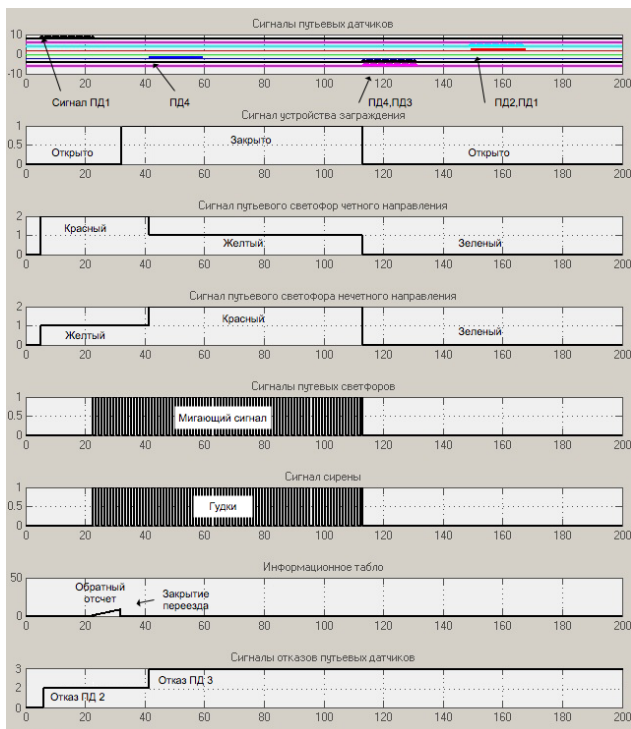


Рис. 10. Временная диаграмма сигналов на выходе АПС-РМПГ, четное направление, отказы ПД2, ПД3 (скорость ПЕ 100 км/ч, длина 500 м. с пояснениями)

Отдельное внимание необходимо обратить на Рис. 9., который демонстрирует временную диаграмму сигналов на выходе АПС-РМПГ, при движении ПЕ в четном направлении, с остановкой на участке переезда, а затем продолжение движения в обратном направлении.

В указанной ситуации, ПЕ двигаясь в четном

направлений пересікає ПД1, ПД2 – ПД3, ПД4 і здійснює зупинку безпосередньо на переїзді, створюючи тим самим, загрозу або непридатність для проїзду АТС. УЗП відкривається тоді, коли система отримує сигнал напрямку від найближчого ПД, яким в даний момент виявився ПД4, ПД3. Основним недоліком в даному випадку, є те, що ПЕ може виявитися обслуговуваним засобом і здійснювати тривалу зупинку, поблизу перетину ЖД колій з автодорогою, блокуючи тим самим проїзд АТС. Такі подібні випадки, зустрічаються достатньо рідко і регламент роботи, як правило, обговорюється з дежурним по станції, який в свою чергу має право дати відповідну команду на відкриття переїзду, а по завершенні роботи, повернути систему в штатний режим роботи.

Рис. 9. зображує тимчасову діаграму сигналів на виході АПС при русі ПЕ в парний напрямку, і виникненні відмов ПД2, ПД3 (в даному випадку відсутня повна відмова ПД, відсутня інформація від датчика) при цьому швидкість ПЕ становить 100 км/ч, довжина 500 м. Як видно з діаграми після проходження ПЕ через ПД1 – сигнал від ПД2 в систему не надходить, на цей момент в алгоритмі передбачено приймати швидкість ПЕ рівною максимально можливою на ділянці – 140 км/ч. Виходячи з цього дієвість часу закриття УЗП встановлюється рівним 40 сек. А відмова ПД3 покривається дублюванням його функцій ПД4. Означеному випадку, виробляється виведення сигналу рівня 2 і 3 в канал СДК.

Аналогічні дослідження були виконані для інших ймовірних комбінацій відмов і умов роботи системи. Згідно з проведенними імітаційними випробуваннями, отримані необхідні діаграми станів.

#### Список літератури:

1. Федухин А.В., Муха А.А., Гладков А.В. Новий підхід до автоматизації переїздів на ж.д. транспорті // Математичні машини та системи. – 2011. – № 3. – С. 135-141
2. Міністерство транспорту та зв'язку України, Про затвердження Інструкції з улаштування та експлуатації залізничних переїздів // Наказ № 54 від 26.01.2007
3. Кириленко А.Г., Счетчики осей в системах залізничної автоматики та телемеханіки // ДВГУПС, 2003. – 75 с.
4. <http://www.mathworks.com/products/sl-plc-coder/>

**Муха А.А.**

Інститут математичних машин та систем  
Національної академії наук України

## МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОБОТИ АПС-РМПП ЗАСОБАМИ ПАКЕТУ MATLAB SIMULINK+ STATEFLOW

#### Анотація

Стаття присвячена проблемі імітаційного моделювання алгоритму роботи гарантоздатної системи для забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах. Приведено результати моделювання засобами пакету Matlab Simulink+Stateflow алгоритму функціонування електронної гарантоздатної системи автоматичної переїздної сигналізації нової генерації з можливістю сигналізації про зайнятість переїзду на шляховий залізничний світлофор і в кабіну машиніста.

**Ключові слова:** відмовостійкість, гарантоздатна система, імітаційне моделювання резервування, відмовостійкість, реконфігурація.

Благодаря моделированию в Matlab Simulink + Stateflow удалось составить алгоритм работы системы АПС-ЭГ, избежав:

- конфликтов состояний системы;
- конфликтов переходов системы;
- выдерживать уровни сигналов и значения переменных;
- исключить заикливания системы.

**Выводы.** В результате моделирования получен алгоритм работы АПС-РМПП, описанный с помощью диаграммы состояний Stateflow, а так же сгенерирован код, соответствующий стандарту IEC 61131 для программируемых логических контроллеров (PLC) и программируемых контроллеров автоматизации (PAC) [4].

```

CASE is_Speed OF
  sfun_target_IN_Calculate:
    (* During 'Calculate': '<S1>:181' *)
    IF (USINT_TO_DINT(is_pd2) = USINT_TO_DINT(sfun_target_IN_on)) AND (dr2 = 2) THEN
      (* Transition: '<S1>:186' *)
      is_Speed := sfun_target_IN_Detect;
      (* Entry 'Detect': '<S1>:152' *)
      Tc := 2000 / (1000 / vt);
    ELSIF (USINT_TO_DINT(is_pd3) = USINT_TO_DINT(sfun_target_IN_on)) AND (dr3 = 1) THEN
      (* Transition: '<S1>:186' *)
      is_Speed := sfun_target_IN_Detect;
      (* Entry 'Detect': '<S1>:152' *)
      Tc := 2000 / (1000 / vt);
    ELSE
      (* Transition: '<S1>:183' *)
      vt := vt + 1;
    END IF;
  END IF;

```

Рис. 11. Фрагмент PLC кода (Описание блока вычисления скорости ПЕ)

Соответствующий код занял 1600 строк и имеет подробные комментарии, что позволяет относительно просто произвести его проверку и сопоставление алгоритму Рис. 11. В дальнейшем полученный код может быть использован в интегрированной среде разработки (IDE) поставщика средств промышленной автоматизации, для компиляции кода и запуска его на контроллерах PLC или PAC.

**Mukha A.A.**

The Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the  
Ukraine National Academy of Science

## MODELING AND DEVELOPMENT WORK ALGORIMA APS-RMPG TOOLS IN THE MATLAB SIMILINK + STATEFOLW

### Summary

The article deals with the problem of simulation works algoritma dependability system to ensure safety at level crossings. The article shows the algorithm of the system is modeled on Matlab Simulink+Stateflow performance of an electronic system of dependable automatic crossing signals the possibility of a new generation signaling employment railroad track crossing at a traffic light and the driver's cab.

**Keywords:** fault tolerance, dependable systems, reconfiguration. simulation.

УДК 531.383

## КОМПЛЕМЕНТАРНИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ КВАДРОКОПТЕРА З КОМПЕНСАЦІЄЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФУ НУЛЯ ДАТЧИКА КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

**Новацький А.О., Коломійцев П.Є., Сапсай П.О.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Моделювання роботи комплементарного фільтра. Застосування комплементарного фільтра для задачі визначення положення квадрокоптера. Безплатформена інерціальна навігаційна система. Компенсація температурного дрейфу нуля датчика куткової швидкості.

**Ключові слова:** квадрокоптер, комплементарний фільтр, температурний дрейф нуля, мікроелектромеханічний датчик.

Останнім часом у світі почала розвиватися галузь безпілотних літальних апаратів (мультикоптерів), які призначені не тільки для дослідження небезпечної для людини місцевості, а також і для здійснення деяких послуг, наприклад, доставки товарів. Якщо мультикоптер має чотири двигуни, то його називають квадрокоптером. В умовах, які небезпечні для життя чи здоров'я людини, для дослідження місцевості, здійснення фото або відеозйомки, вимірювання параметрів навколишнього середовища, використовується різного роду роботизована техніка. Для ефективного виконання поставлених завдань літальний апарат (квадрокоптер) повинен мати надійну і ефективну підсистему стабілізації, оскільки від якості її роботи залежить успіх виконання поставленого перед літальним апаратом завдання. Класичний літак (планер) конструктивно має властивість стійкості – властивість відновлювати без втручання пілота кінематичні параметри руху до моменту збурення і повертатися до вихідного режиму польоту після припинення збурень. Але літак (планер) позбавлений можливості зависання – дуже важливої ознаки для робота-дослідника. Квадрокоптер конструктивно властивістю стійкості не володіє, але має ряд якостей, які необхідні для робота-дослідника, а саме: маневреність, можливість розміщення додаткового обладнання, наприклад, фотоапарата, вертикальне переміщення та ін. Стабілізувати квадрокоптер вручну дуже складно для людини, тому виникає необхідність у використанні мікропроцесорної техніки і ряду датчиків для створення підсистеми стабілізації. Саме цей блок квадрокоптера дозволяє йому завжди залишатися в заданому положенні (в стійкому стані), незважаючи на дію різних зовнішніх збурень – вітру, бортового вантажу, змінної щільності повітря та ін.

Для визначення положення квадрокоптера у просторі використовується безплатформена інерціальна навігаційна система, оскільки вона є легкою, споживає малу потужність, має невисоку вартість та проста в експлуатації [5].

Обробка даних від датчиків положення квадрокоптера у просторі потребує окремого розгляду, оскільки виникає ряд наступних проблем: зашумленість показів, висока чутливість та температурний дрейф нуля датчиків.

Далі в статті буде запропоновано метод визначення кутів тангажу та крену квадрокоптера з компенсацією температурного дрейфу нуля датчика куткової швидкості.

Задачу визначення кутів нахилу відносно горизонту вирішує пристрій, який називається інклінометр, і який може бути побудований на основі мікроелектромеханічних датчиків. Датчики на основі мікроелектромеханічних систем (MEMS, microelectromechanical systems) дуже поширені у портативній техніці, але через шуми вимірів такий інклінометр будують на основі декількох датчиків [1]. Інклінометр для квадрокоптера може бути сконструйований за допомогою датчика куткової швидкості (гіроскопа) та акселерометра. Вихідним сигналом сучасних MEMS-гіроскопів є кутова швидкість, яка може бути масштабована під різний вимірюваний діапазон. Таким чином, застосувавши один з методів дискретного інтегрування (оскільки вихідний сигнал датчика – цифровий), можна отримати значення кута нахилу. Однак у MEMS-гіроскопів існує великий недолік – дрейф нуля. Це означає, що при зупинці обертання гіроскопа він буде показувати ненульове значення куткової швидкості, причому величина дрейфу нуля гіроскопа сильно залежить від температури навколишнього середовища. Наступним недоліком є застосування процедури дискретного інтегрування, точність якої прямо пропорційна кількості обчислювальних процесів за-